

ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ

Минск
БНТУ
2014

УДК 621.32 (075.8)

А в т о р ы :

*В.А. Анищенко, В.Б. Козловская,
В.Н. Радкевич, И.В. Колосова*

Оценка и повышение эффективности работы осветительных установок промышленных предприятий / В.А. Анищенко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – 218 с. – ISBN 978-985-550-478-9.

В работе произведен анализ структуры систем электрического освещения промышленных предприятий. Рассмотрены особенности световых приборов как приемников электроэнергии, их основные характеристики и влияние на надежность и эффективность работы осветительных установок. Получены аналитические зависимости, позволяющие приближенно определять фактическую температуру жилы проводника в зависимости от коэффициента предварительной нагрузки осветительной линии и температуры окружающей среды.

Монография будет полезна специалистам, активно занимающимся вопросами энергосбережения промышленных потребителей, аспирантам, магистрантам, студентам энергетических специальностей вузов, а также работникам энергослужб промышленных предприятий.

Табл. 35. Ил. 30. Библиогр. 50 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 9 от 30.10.2013 г.)

Р е ц е н з е н т ы :

доктор технических наук, профессор *Е.П. Забелло*, БГАТУ;
доктор технических наук, профессор *И.И. Сергей*, БНТУ

ISBN 978-985-550-478-9

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

Содержание

| | |
|--|-----------|
| Введение | 7 |
| 1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ, ИХ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ | 9 |
| 1.1. Характеристика систем электрического освещения | 9 |
| 1.2. Источники света и их основные характеристики | 16 |
| 1.3. Анализ основных показателей, характеризующих эффективность источников света | 36 |
| 1.4. Осветительные установки и их основные элементы | 42 |
| 1.5. Актуальность вопросов повышения эффективности и надежности осветительных установок | 55 |
| 2. НАГРЕВАНИЕ И ТЕПЛОВОЙ ИЗНОС ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДНИКОВ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ | 62 |
| 2.1. Анализ тепловых режимов проводов и кабелей электрических осветительных сетей | 62 |
| 2.2. Допустимые длительные токи проводников осветительных установок | 68 |
| 2.3. Выбор сечений жил проводников по допустимому нагреву | 71 |
| 2.4. Приближенная оценка температуры нагрева жил проводов и кабелей | 75 |
| 2.5. Старение изоляции проводников электрических сетей | 77 |

| | |
|---|-----|
| 3. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК | 79 |
| 3.1. Показатели качества напряжения, влияющие на работу осветительных установок | 79 |
| 3.2. Статические характеристики активной мощности световых приборов по напряжению | 85 |
| 3.3. Влияние напряжения на световой поток | 90 |
| 3.4. Зависимость световой отдачи источников света от напряжения..... | 92 |
| 3.5. Влияние напряжения на срок службы источников света..... | 96 |
| 4. ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКА СВЕТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ..... | 101 |
| 4.1. Общая характеристика световых приборов как потребителей электроэнергии | 101 |
| 4.2. Определение показателей электропотребления газоразрядных источников света опытным путем | 103 |
| 4.3. Анализ экспериментальных данных, отражающих зависимость показателей электропотребления газоразрядных источников света от напряжения..... | 106 |
| 4.4. Статистическая оценка показателей электропотребления газоразрядных ламп в зависимости от напряжения | 110 |
| 4.5. Световые приборы как источники высших гармоник..... | 120 |

| | |
|---|------------|
| 4.6. Влияние высших гармонических составляющих тока и напряжения на эффективность работы электрических сетей..... | 126 |
| 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ..... | 130 |
| 5.1. Схемы подключения светодиодов | 130 |
| 5.2. Достоинства и недостатки светодиодных источников света... 131 | |
| 5.3. Возможные области применения светодиодных изделий | 136 |
| 5.4. Эффективность применения светодиодных светильников для освещения производственного помещения..... | 140 |
| 5.5. Эффективность применения светодиодных светильников в системе жилищно-коммунального хозяйства..... | 153 |
| 6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ..... | 164 |
| 6.1. Общая характеристика и классификация методов | 164 |
| 6.2. Оценка снижения расхода электроэнергии на освещение за счет внедрения энергосберегающих мероприятий..... | 166 |
| 6.3. Способы снижения уровня высших гармоник тока и напряжения в электрических осветительных сетях | 177 |
| 6.4. Особенности выбора устройств защиты от сверхтоков в осветительных установках..... | 180 |

| | |
|--|-----|
| 6.5. Проверка сечений жил кабелей электрических сетей осветительных установок по термической стойкости | 187 |
| 6.6. Выбор сечения проводников осветительных сетей по допустимой потере напряжения с учетом реактивного сопротивления..... | 190 |
| 6.7. Обеспечение эффективности осветительных установок в условиях эксплуатации | 193 |
| 6.8. Повышение эффективности осветительных установок путем рационального управления световыми приборами | 198 |
| Заключение..... | 203 |
| Список использованных источников..... | 208 |
| Приложение | 212 |

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением государственной политики Республики Беларусь является политика энергосбережения, обеспечивающая экономическую безопасность страны. Принятый «Закон об энергосбережении» [1] обязывает всех потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), независимо от форм собственности, рационально использовать ТЭР. Необходимость жесткого контроля со стороны государства за рациональным использованием всех видов ТЭР определяется тем, что страна импортирует примерно 80% всех энергоресурсов при высоких мировых ценах на них. Ежегодные затраты на энергоресурсы превышают 2 млрд. долларов США, что составляет почти 1/6 часть внутреннего валового продукта. Снижение затрат на импорт энергоресурсов за счет энергосбережения, а также вовлечение в энергетический баланс собственных энергоресурсов способствует более устойчивому развитию экономики страны и обеспечению роста энергетической безопасности.

В этих условиях задача эффективного использования электрической энергии в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, на транспорте, в коммунально-бытовом секторе приобретает особую актуальность.

Во всем мире на искусственное освещение приходится примерно 20 % от общего объема электропотребления. Доля электрического освещения в электропотреблении разных стран не одинакова. В промышленно развитых странах расход электроэнергии осветительными установками составляет 5 – 15 %, а в развивающихся странах может достигать 80 % и более от общего годового расхода электроэнергии. Ежегодное потребление электроэнергии в Республики Беларусь составляет более 37 млрд. кВт·ч. Согласно оценкам экспертов, на электрическое освещение от этого объема затрачивается 19% (7млрд. кВт·ч). В стоимостном выражении это составляет более 700 млн. долларов США при тарифе на электроэнергию 0,1 доллара США/кВт·ч. Например, на освещение одной кольцевой автомобильной дороги, где установлено примерно 5500 светильников, ежегодно затрачивается примерно 1 млн.долларов США.

В экономике Республики Беларусь недостаточно используется энергоэффективное осветительное оборудование, применяются в

основном недолговечные или экологически небезопасные источники света: лампы накаливания и газоразрядные лампы высокого и низкого давления. Альтернативой перечисленным лампам являются полупроводниковые светодиодные источники света, теоретически обладающие более высокой световой чувствительностью, экологической безопасностью, виброустойчивостью, легкой управляемостью, большим сроком службы и питающиеся от низкого напряжения.

Однако широкому применению светодиодных ламп в Республике Беларусь препятствуют, во-первых, низкая надежность драйверов светильников, нестабильность светового потока во времени, несоответствие рекламируемых и реальных показателей работы большинства выпускаемых ламп, в т.ч. срока службы, и, во-вторых, слишком высокая стоимость светодиодных ламп по отношению к тарифам на электроэнергию [2,3]. Очевидно, в настоящее время следует, с учетом перечисленных факторов и области применения, искать разумный компромисс при выборе тех или иных источников электрического освещения.

Учитывая изложенное выше, можно полагать, что в ближайшей перспективе в Республике Беларусь для освещения производственных и общественных зданий будут в основном применяться энергоэкономичные газоразрядные источники света. Среди указанных источников света наиболее высокую световую отдачу имеют натриевые лампы, которые широко используются там, где не предъявляются повышенные требования к цветопередаче. С учетом определенного консерватизма большинства людей и высокой стоимости энергосберегающих источников света можно предположить, что квартиры жилых домов в течение достаточно длительного периода в основном будут по-прежнему освещаться лампами накаливания, а также компактными люминесцентными лампами. В новых и реконструируемых осветительных установках общедомовых помещений и лестничных клеток будут использоваться светильники с люминесцентными лампами низкого давления и со светодиодами. В связи с этим исследование электропотребления и эффективности применения световых приборов с газоразрядными лампами и светодиодами представляет собой актуальную задачу.

1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ, ИХ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПОКАЗАТЕЛИ

1.1. Характеристика систем электрического освещения

Система электрического освещения представляет собой совокупность взаимосвязанных технических устройств (источников света, светильников, электрических аппаратов, электропроводок, кабельных линий и т.д.), предназначенных для искусственного освещения помещений зданий и наружных объектов. Внутри помещений по способу размещения светильников и распределению освещенности различают следующие системы искусственного освещения: общее и комбинированное.

Общим называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием или рабочими местами, так и вспомогательную. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное общее освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая тем самым одинаковую освещенность всего помещения. Оно применяется, как правило, когда расположение рабочих зон при проектировании неизвестно либо при гибкой планировке. При общем локализованном освещении светильники размещают с учетом расположения технологического оборудования, создавая на отдельных поверхностях требуемый уровень освещения.

Комбинированная система освещения состоит из общего и местного освещения. Общее освещение предназначено для освещения проходов и участков, где работы не производятся, а также для выравнивания яркости в поле зрения работающих. Местное освещение обеспечивается светильниками, располагаемыми непосредственно на рабочих местах. Ему следует отдавать предпочтение, если в нескольких рабочих зонах помещения должны решаться различные зрительные задачи и поэтому для них требуются различные уровни освещенности. Оно также необходимо, когда рабочие места территориально отдалены друг от друга. При этом следует иметь в виду, что устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещенности рабочих поверхностей и

окружающего пространства, что неблагоприятно сказывается на зрении.

В соответствии с [4] искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное, охранное и дежурное. При необходимости часть светильников рабочего или аварийного освещения может использоваться для дежурного освещения.

Рабочее освещение предназначено для создания нормальной освещенности на рабочих местах.

Аварийное освещение обеспечивает требуемую освещенность при внезапном отключении рабочего освещения. Данный вид освещения разделяется на освещение безопасности и эвакуационное.

Освещение безопасности следует предусматривать в тех случаях, когда отключение рабочего освещения и связанное с этим нарушение обслуживания оборудования и механизмов может вызвать:

- взрыв, пожар, угрозу жизни и здоровью людей;
- длительное нарушение технологического процесса;
- нарушение работы ответственных объектов (электростанций, узлов радио- и телевизионных передач и связи, диспетчерских пунктов, насосных установок водоснабжения, канализации и теплофикации, установок вентиляции и кондиционирования воздуха для производственных помещений, в которых недопустимо прекращение работ и т.п.);
- нарушение режима детских учреждений независимо от числа находящихся в них детей.

Эвакуационное освещение в помещениях или в местах производства работ вне зданий следует предусматривать [12]:

- в местах, опасных для прохода людей;
- в проходах и на лестницах при числе эвакуирующихся более 50 человек;
- по основным проходам производственных помещений, в которых работают более 50 человек;
- на лестничных клетках жилых домов шести и более этажей;
- в помещениях общественных зданий, административных и бытовых зданий промышленных предприятий, если там одновременно могут находиться более 100 человек;

- в производственных помещениях с постоянно работающими в них людьми, выход которых при отключенном рабочем освещении связан с опасностью травматизма;

- в производственных помещениях без естественного света.

Светильники освещения безопасности в помещениях могут использоваться для эвакуационного освещения. В этом случае при размещении светильников следует учитывать необходимость освещения проходов.

При выполнении эвакуационного освещения обычно ограничиваются установкой светильников только по линии основных проходов.

Освещение безопасности должно обеспечивать не менее 5 % освещенности рабочего освещения, но не менее 2 лк внутри зданий и не менее 1 лк для территорий предприятий. При этом внутри зданий освещенность должна быть не более 30 лк при разрядных лампах и не более 10 лк – при лампах накаливания.

Эвакуационное освещение должно обеспечивать наименьшую освещенность на полу основных проходов (или на земле) в помещениях 0,5 лк, на открытых территориях – 0,2 лк. Неравномерность эвакуационного освещения (отношение максимальной освещенности к минимальной) по оси эвакуационных проходов должна быть не более 40:1 [13].

Пути эвакуации следует обеспечивать эвакуационным освещением и оборудовать знаками пожарной безопасности. Пути эвакуации и указатели, обозначающие выходы и маршруты движения при эвакуации, необходимо оснащать средствами искусственного освещения (дополнительные системы аварийного освещения, автоматически включающиеся при отказе основной осветительной сети).

Для аварийного освещения можно применять следующие источники света:

1) лампы накаливания;

2) люминесцентные лампы – в помещениях с минимальной температурой воздуха не менее 10°C при условии, что во всех режимах напряжение, подводимое к лампам, имеет величину не ниже 90 % номинального;

3) разрядные лампы высокого давления при условии их мгновенного или быстрого повторного зажигания как в горячем

(после кратковременного отключения питающего напряжения), так и в холодном состоянии.

Световые приборы как освещения безопасности, так и эвакуационного освещения допускается предусматривать горящими, включаемыми одновременно со световыми приборами рабочего освещения, а также не горящими, автоматически включаемыми при прекращении питания рабочего освещения.

Отметим, что если для аварийного освещения используются светильники с газоразрядными лампами, то их, как правило, выделяют из состава светильников рабочего освещения, подключая к независимому источнику питания.

Световые указатели «Выход» следует устанавливать над дверными проемами эвакуационных выходов:

- из здания наружу (при отсутствии естественного освещения на примыкающих к ним общих путях эвакуации);
- из помещений с массовым пребыванием людей;
- из общих коридоров, холлов или фойе при количестве эвакуирующихся с этажа более 50 человек, а при их расположении на шестом этаже и выше (кроме технических) – независимо от количества людей;
- с эстрад или сцен зальных помещений с массовым пребыванием людей.

Световые указатели, обозначающие маршруты движения при эвакуации, следует устанавливать на высоте не ниже 2 м вдоль общих коридоров длиной более 25 м или в протяженных помещениях (в случае необходимости). При этом световые указатели должны устанавливаться на расстоянии не более 25 м друг от друга, а также в местах поворотов общих коридоров.

Световые указатели должны включаться одновременно с основными световыми приборами рабочего освещения.

Охранное освещение является разновидностью рабочего освещения и устраивается по периметру территории, охраняемой в ночное время. Оно должно обеспечивать не менее 0,5 лк на уровне земли в горизонтальной плоскости или на уровне 0,5 м от земли в вертикальной плоскости (с соответствующей стороны).

Под дежурным понимается освещение в нерабочее время. Область применения, величины освещенности, требования к качеству для дежурного освещения не нормируются.

При выборе системы освещения нужно исходить из характера зрительной работы, выполняемой в помещении, учитывая блескость и затенение рабочих поверхностей технологическим оборудованием и находящимися в помещении людьми. Блескость является одной из самых неприятных проблем освещения. В большинстве случаев блескость снижает остроту восприятия из-за усталости, следствием чего являются плохая концентрация и дефекты зрения. Различают прямую и отраженную блескость. Прямая блескость возникает при взгляде на очень яркое световое пятно, например на лампу в светильнике, расплавленный металл, сварку и т. п. Исключить блескость можно, подобрав подходящие светильники и правильно расположив их относительно рабочих мест. Отраженная блескость возникает вследствие отражения света от глянцевых или зеркальных поверхностей (дисплеи, мебель, бумага с художественной печатью и т. п.). Для предотвращения отраженной блескости необходимо критически оценить не только типы и расположение светильников, но и материал освещаемых поверхностей. Для ограничения отраженной блескости на горизонтальных поверхностях нормируется показатель ослепленности

$$P = (S-1) \cdot 1000,$$

где S - коэффициент ослепленности, равный отношению пороговых разностей яркости при наличии и отсутствии слепящих источников в поле зрения.

Распределение яркости (освещенности) по освещаемому объекту определяет контраст различаемого объекта с фоном. Контраст объекта различения с фоном определяется по выражению

$$K = (L_{\text{фона}} - L_{\text{объекта}}) / L_{\text{фона}},$$

где $L_{\text{фона}}$ – яркость фона, кд/м²;

$L_{\text{объекта}}$ – яркость объекта различения, кд/м².

Контраст объекта с фоном считается большим при $K > 0,5$ (при этом объект и фон резко отличаются по яркости и предмет хорошо различим на фоне), средним при $0,2 \leq K \leq 0,5$ (объект и фон

заметно отличаются по яркости) и малым при $K < 0,2$ (объект и фон мало отличаются по яркости).

Нормы освещенности при использовании естественного и искусственного освещения промышленных помещений, работ на открытом воздухе, общественных и жилых зданий, улиц, дворов и площадей населенных пунктов регламентированы [4,14,15]. Они установлены на основе классификации по некоторым количественным признакам. Основным признаком, определяющим разряд зрительной работы, является размер объекта различения – рассматриваемого предмета, отдельной его части или дефекта, которые требуется различать в процессе работы. В соответствии с этим признаком устанавливаются точные работы I – VI разрядов, работа со светящимися материалами относится к VII разряду, общее наблюдение за ходом производственного процесса и инженерными коммуникациями относится к VIII разряду. Кроме того, зрительная работа, связанная с различением объектов при фиксированной и нефиксированной линии зрения в зависимости от размера объекта различения относится к разряду А, Б или В, обзор окружающего пространства при очень кратковременном различении объектов в зависимости от насыщенности пространства светом – к разрядам Г, Д, Е, общая ориентировка в пространстве – к разряду Ж.

При размере деталей менее 0,15 мм работы относятся к разряду I (наивысшая точность) и требуют освещенности 1500 лк при общем освещении, а последний (VI) разряд относится к работам, при которых различаются детали более 5 мм (очень малая точность) и требуется освещенность 150 лк при общем освещении.

Основные нормы освещенности относятся к установкам с газоразрядными источниками света. Для случая применения ламп накаливания устанавливаются пониженные значения освещенности, исходя из необходимости экономии электроэнергии.

Нормированные значения освещенности должны быть обеспечены в течение всего периода промышленной эксплуатации осветительной установки. Однако из-за старения и загрязнения ламп, светильников и поверхностей помещения уровень освещенности со временем снижается. Это необходимо учитывать при проектировании осветительной установки. Поэтому начальная освещенность должна быть несколько больше нормированной, что

достигается введением коэффициента запаса K_z , значения которого также регламентированы. В зависимости от типа ламп и светильников, наличия пыли и других загрязнений в помещении, способа обслуживания и длительности эксплуатации значение коэффициента K_z обычно принимается в пределах 1,4–1,7 (таблица 1.1).

Нормы освещенности для различных помещений и производственных участков приведены [4,5]. Для большинства помещений значения освещенности даются для осветительных установок с газоразрядными лампами, которые являются наиболее экономичными источниками света и широко применяются в производственных зданиях. Только для некоторых помещений, где могут применяться и осветительные установки с лампами накаливания, в скобках указаны освещенности и типы осветительных приборов при использовании этих ламп.

Таблица 1.1

Значение коэффициента запаса K_z , учитывающего снижение освещенности в процессе эксплуатации светового прибора

| Тип помещения | Коэффициент запаса K_z |
|--|--------------------------|
| Цементные заводы, обрубные отделения литейных цехов, агломерационные фабрики | 1,7 |
| Цеха кузнечные, литейные, мартеновские, сборного железобетона, цеха химических заводов по выработке кислот, щелочей, удобрений; цеха гальванических покрытий и электролиза | 1,6 |
| Цеха инструментальные, сборочные, механические, механосборочные, пошивочные | 1,4 |
| Территории металлургических, химических, горнодобывающих и других промышленных предприятий, шахт, рудников, | 1,5 |

| | |
|--|-----|
| железнодорожных станций; территории общественных зданий | |
| Горячие цеха предприятий общественного питания, помещения прачечных, душевые | 1,6 |
| Кабинеты и рабочие помещения, жилые комнаты, учебные классы, читальные и торговые залы | 1,4 |
| Улицы, площади, парки, пешеходные и транспортные тоннели | 1,5 |

Примечание. Значения коэффициентов запаса приведены для газоразрядных источников света. При использовании ламп накаливания указанные коэффициенты следует умножать на 0,85.

При общем освещении помещений производственных и складских зданий, а также помещений общественных и жилых зданий, административных и бытовых зданий предприятий следует использовать, как правило, более экономичные разрядные лампы. Лампы накаливания (в том числе галогенные) применяют для местного освещения, а также в случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности использования разрядных ламп.

1.2. Источники света и их основные характеристики

Искусственным источником света называют устройство, предназначенное для превращения какого-либо вида энергии в оптическое излучение [4]. По физической природе различают два вида оптического излучения: тепловое и люминесцентное. Соответственно существующие источники света (ИС) принципиально различаются по способу получения оптического излучения. В первых для этой цели используется нагревание тел (лампы накаливания), а во вторых оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в определенной среде и люминесценции (газоразрядные лампы). Светодиоды (СД) представляют собой полупроводниковые приборы, преобразующие электрическую энергию непосредственно в видимое излучение.

Для оценки работы ИС применяются следующие основные характеристики:

- **световой поток** представляющий собой излучение, которое воспринимается зрением человека как видимый свет. За единицу измерения светового потока принят люмен (лм);

- **колориметрические параметры**, с помощью которых оценивают цвет излучаемого света и качество передачи цветов освещаемых предметов. Цветность излучения источника света определяется **цветовой температурой** (T_c), измеряемой в кельвинах (К). Чем большее значение имеет этот показатель, тем более близок к естественному цвет излучаемого света. Существуют три главные цветности света: тепло-белая ($T_c < 3300$ К), нейтрально-белая ($T_c = 3300-5000$ К) и белая дневного света ($T_c > 5000$ К). Однако лампы с одинаковой цветностью света могут по-разному передавать цвета освещаемых предметов, что объясняется отличием спектрального состава излучаемого ими света. Качество цветопередачи выражается общим **индексом (коэффициентом) цветопередачи** (R_a), который показывает соответствие зрительного восприятия цветного объекта, освещенного исследуемым и эталонным источниками света при определенных условиях наблюдения. Его максимальное значение составляет 100. Источники света, имеющие значение $R_a = 90-100$, обладают очень хорошей цветопередачей, а уровень $R_a = 50$ и менее соответствует слабой цветопередаче;

- **коэффициент пульсации светового потока**. Излучение газоразрядных ламп пульсирует с удвоенной частотой переменного тока, питающего осветительную установку. Глубина пульсации оценивается **коэффициентом пульсации** K_n , значение которого выражается в процентах. Наибольшее значение коэффициента пульсации нормируется в зависимости от разряда зрительных работ и установлено в пределах от 10 до 20 %;

- **световая отдача**, позволяющая оценивать экономичность источника света (H), единицей измерения которой принят люмен на ватт (лм/Вт). Более экономичные источники света имеют более высокое значение световой отдачи;

- **срок службы**, являющийся одним из важнейших показателей надежности ИС. Обычно под сроком службы понимается время, в течение которого обеспечивается сохранение светового потока источника света в допустимых пределах.

В зависимости от требований к освещенности конкретных объектов при выборе источников света могут использоваться и другие световые характеристики [5,6,7].

Рассмотрим источники света, применяемые в осветительных установках различных объектов.

Лампы накаливания (ЛН). Для получения видимого излучения в лампах накаливания применяется нагревание тела. Однако видимое излучение возникает только при больших температурах излучаемого тела (от 1500 до 5000 К). В современных лампах накаливания в качестве материала тела накала широко используется вольфрам, который является тугоплавким металлом (его температура плавления порядка 3600 К) и обладает достаточно высокой пластичностью и низкой скоростью испарения. Для исключения окисления металла, лампы накаливания выполняются вакуумными. С целью увеличения срока службы и повышения световой отдачи лампы, а также стабильности ее светового потока стремятся снизить скорость испарения материала тела накала. Для этого колбы ламп накаливания наполняют аргон-азотной или криптон-ксеноновой смесью (газонаполненные лампы).

Простота схемы включения делает лампы накаливания надежными источниками света. Их невысокая стоимость и удобство эксплуатации, разнообразие конструкций, напряжений и мощностей обуславливают в ряде случаев применение этого источника света. Важным достоинством ламп накаливания являются также низкие значения коэффициента пульсации светового потока (среднее значение составляет около 7 %). Лампы практически не критичны к изменениям условий внешней среды, включая температуру, но очень чувствительны к отклонениям подводимого напряжения. Главным недостатком ламп накаливания является их низкая световая отдача, не превышающая 20 лм/Вт, что значительно ниже, чем у газоразрядных ламп. В сравнении с газоразрядными лампами срок службы ламп накаливания также существенно меньше. Все это ограничивает применение ламп накаливания, которые в производственных и общественных зданиях практически вытеснены газоразрядными лампами.

В маркировке ламп буква В обозначает вакуумные лампы, Г – газонаполненные лампы, К – лампы с криптоновым наполнением, Б – биспиральные лампы. Далее указывается напряжение в вольтах

и номинальная мощность в ваттах. Лампы также могут изготавливаться в матированных, молочных или опалиновых колбах, имеют резьбовой цоколь типа Е диаметром 27 или 40 мм. Световая отдача ламп основной серии лежит в пределах 11,8–20 лм/Вт. Номинальный срок службы ламп 1000 ч. Излучение ламп накаливания по цветности более желтое по сравнению с естественным дневным светом (цветовая температура $T_c = 2400\text{--}2700\text{ K}$) и при их применении не обеспечивается правильная цветопередача.

Галогенные лампы накаливания являются усовершенствованной разновидностью ламп накаливания. В колбу этих ламп добавлен галоген (обычно йод или бром), за счет чего в них осуществляется регенерация вольфрамовой спирали. Колба галогенной лампы накаливания выполнена из прочного кварцевого стекла и имеет значительно меньшие габариты по сравнению с обычной лампой накаливания. Кварцевое стекло – жаропрочный материал, а маленькие габариты гарантируют прочность, достаточную для создания более высокого давления газа, что замедляет испарение вольфрама. Галогенный цикл позволяет повысить световую отдачу до 26 лм/Вт при увеличении продолжительности горения лампы до 2000–4000 ч.

В условном обозначении типов галогенных ламп буквы и числа означают: первая буква – материал колбы (К – кварцевая), вторая – галогенную добавку (Г – галоген), третья и последующие буквы – область применения (СМ – самолетная) или конструктивную особенность (М – малогабаритная, К – с концентрированным телом накала), первое число – напряжение в вольтах, второе – мощность в ваттах и третье – порядковый номер разработки.

Свет галогенных ламп более белый, чем свет обычных ламп накаливания ($T_c = 3000\text{ K}$), и в отношении цветопередачи признается пригодным даже для освещения экспонатов в музеях ($R_a > 90$). Однако галогенную лампу нельзя трогать руками, так как колба ее сделана из плавленого кварца, который кристаллизуется под действием жира, остающегося на поверхности лампы при прикосновении. Это приводит к разрушению колбы и перегоранию лампы.

В настоящее время ведущими мировыми производителями светотехнической продукции освоен выпуск галогенных ламп накаливания с колбами из стекла, поглощающего ультрафиолетовую составляющую. Такое кварцевое стекло колбы полностью удерживает интенсивное и вредное ультрафиолетовое излучение типа *UVC* и

UVB , а более слабое и поэтому более безопасное излучение типа UVA ограничивается наполовину.

Галогенные лампы выпускаются для работы, как на сетевом, так и на пониженном напряжении. Для обеспечения возможности подключения галогенных ламп на пониженное напряжение могут быть использованы как электронные преобразователи напряжения (электронные трансформаторы), так и индукционные (электромагнитные трансформаторы).

Газоразрядные лампы (ГЛ) – это источники света, в которых оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в газах, парах металлов или их смесях [7].

Конструктивно большинство ГЛ представляют собой стеклянную колбу в виде трубки, сферы и т.п., с впаянными в нее электродами, между которыми происходит разряд. Из колбы откачивают воздух и наполняют ее инертным газом при соответствующем давлении. В большинстве случаев в колбу добавляется небольшое количество металла с высокой упругостью паров (ртутью, натрием и др.), в некоторые из них вводятся также специальные излучающие добавки (галогениды различных металлов).

По типу разряда ГЛ делятся на лампы тлеющего, дугового и импульсного разряда [6]. Тип разряда, устанавливающийся в лампе после зажигания, определяется значениями питающего напряжения, балластного устройства, типом катода и давлением среды внутри лампы. В большинстве ГЛ, применяемых для освещения, используются дуговые разряды, поскольку с их помощью удастся создать высокоэффективные источники света с разнообразными характеристиками при сравнительно невысоких рабочих напряжениях.

По величине рабочего давления внутри разрядной трубки лампы разделяются на ГЛ низкого давления (примерно от 0,1 Па до 25 кПа) – ГЛНД; высокого давления (от 25 до 1000 кПа) – ГЛВД; сверхвысокого давления (свыше 1000 кПа) – ГЛСВД. Для внутреннего освещения помещений коммунально-бытовых, общественных и промышленных потребителей, а также наружного освещения применяются ГЛ высокого и низкого давления.

Газоразрядные лампы низкого давления. Трубочатые люминесцентные лампы низкого давления, получившие широкое применение в осветительных установках, по своим характеристикам существенно отличаются от ламп накаливания.

Люминесцентная лампа (ЛЛ) представляет собой запаянную с обоих концов стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем люминофора (люминофоры – твердые или жидкие вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений). Из трубки откачан воздух, и она заполнена аргоном или смесью инертных газов при давлении около 300 Па с добавлением капельки ртути, которая при нагревании превращается в ртутные пары. Внутри трубки на ее концах в стеклянных ножках впаяны электроды с вольфрамовой биспиральной нитью, покрытой слоем оксидов щелочноземельных металлов (бария, кальция, стронция), способствующих более интенсивному излучению электронов. Электроды присоединены к контактными штырькам, закрепленным в цоколе.

Когда к противоположным электродам подводится напряжение определенной величины, возникает электрический разряд в газовой среде лампы с выделением теплоты, под действием которой ртуть испаряется. При этом излучение в видимой части спектра очень незначительно, и световая отдача разряда составляет не более 5 – 7 лм/Вт. Однако разряд сопровождается мощным ультрафиолетовым излучением, часть которого люминофор преобразует в видимое излучение. Цвет излучаемого света и эффективность работы лампы зависит от выбранного люминофора и его качества.

Люминесцентные лампы дугового разряда подразделяют на лампы общего и специального назначения. Их условное обозначение состоит из нескольких букв и чисел. Первая буква (Л) характеризует принадлежность лампы к данному виду, следующие буквы означают либо цвет излучения, либо особенности спектра излучения: Б – белая; Д – дневная; Е – естественная; ТБ – тепло-белая; ХБ – холодно-белая; Ф – фотосинтетическая; УФ – ультрафиолетовая; К, Ж, Р, З, Г – соответственно красная, желтая, розовая, зеленая, голубая; Ц – с улучшенной цветопередачей. Далее следуют буквы, обозначающие конструктивные особенности ламп: А – амальгамная; Б – быстрого пуска; К – кольцевая; Р – рефлекторная; U-образная; Щ – щелевая. Число после букв показывает номинальную мощность в ваттах, а следующее число – отличительную особенность лампы по сравнению с базовой моделью.

Люминесцентные лампы общего назначения с международной маркировкой T12 представляют собой трубчатые конструкции диа-

метром 38 мм. Лампы предназначены для общего освещения помещений, а также для применения в наружных установках. Питаются от сети переменного тока напряжением 230 В частотой не менее 50 Гц. Лампы оснащены штыревыми цоколями типа *G* и *Fa*. Следует отметить, что данный вид ламп в настоящее время выпускается ведущими мировыми производителями светотехнической продукции главным образом для замены их в существующих светильниках, так как разработаны аналогичные источники света с лучшими техническими характеристиками.

Серия энергоэкономичных ЛЛ с колбой диаметром 26 мм имеет международную маркировку *T8* и предназначена для общего и местного освещения промышленных, общественных, административных и жилых помещений. Их особенностью является пониженная на 10 % мощность по сравнению с лампами *T12* при сохранении тех же светотехнических характеристик. Энергоэкономичные ЛЛ эксплуатируются как с электронными, так и с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами (ПРА) в светильниках, предназначенных и для стандартных, и специально разработанных ламп. Средний срок службы ламп *T8* составляет 9 -15 тыс. часов. В то же время ведущими мировыми производителями выпускаются отдельные разновидности ламп, у которых продолжительность горения достигает 42 тыс. часов. Следует иметь в виду, что у энергоэкономичных ламп повышено напряжение зажигания, поэтому их нельзя применять в бесстартерных схемах. Их не рекомендуется применять и в стартерных схемах с обычными стартерами при пониженных напряжениях сети, повышенной влажности и при температуре окружающей среды ниже +10°C. Для надежного зажигания в стартерных схемах целесообразно использовать унифицированный стартер, дающий более длительный и высокий импульс напряжения (900 В вместо 400 В) [6]. В случае несоблюдения указанных условий срок службы ламп сильно снижается.

В настоящее время ведущими мировыми производителями светотехнической продукции освоен выпуск новых ЛЛ с диаметром разрядной трубки 16 мм (международная маркировка *T5*). Лампы типа *T5* обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными лампами предыдущих поколений. В частности, они обладают более высокой световой отдачей (до 104 лм/Вт) и потребляют на 30% меньше энергии, чем лампы типа *T8*. Эти лампы предназна-

ны для работы с высокочастотным ЭПРА. Люминесцентные лампы типа *T5* обладают значительно большим сроком службы (до 30 тыс. ч). Максимум светового потока у них смещен в сторону более высоких температур и наблюдается при температуре внутри светильника 35°C в отличие от других люминесцентных ламп, у которых максимальное значение светового потока имеет место при 25°C . Значительно меньшее значение имеет спад светового потока к концу срока службы лампы, который составляет приблизительно 5%. Лампа также характеризуется пониженным содержанием ртути (1,5 - 3 мг).

Компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) работают по такому же принципу, как и обычные люминесцентные лампы, но имеют другое конструктивное исполнение. В зависимости от размещения ПРА различают интегрированные и неинтегрированные КЛЛ.

Интегрированные КЛЛ предназначены для непосредственной замены малоэффективных ламп накаливания и позволяют экономить до 75 % потребляемой электроэнергии. Они имеют встроенный электронный пускорегулирующий аппарат и снабжены стандартным резьбовым цоколем типа *E* диаметром 14, 27 и 40 мм. Поскольку эти лампы работают на высоких частотах, они не имеют пульсаций светового потока, характерных для люминесцентных ламп, работающих с электромагнитным ПРА. Интегрированные КЛЛ не могут применяться в системах с регулированием светового потока. Срок службы этих ламп составляет около 10 тыс. часов.

Неинтегрированные КЛЛ работают с выносным, электромагнитным или электронным ПРА и выполняются со штыревым цоколем типа *G*. Эти лампы имеют больше разновидностей по цветовому исполнению, чем интегрированные КЛЛ. Срок службы ламп составляет 10 – 15 тыс. часов. При работе ламп с электромагнитным ПРА (ЭМПРА) средний срок службы лампы несколько сокращается.

КЛЛ мощностью 5, 7, 9 и 11 Вт с цоколем *2G7* при работе с ЭПРА могут применяться в системах, где требуется диммирование (регулирование светового потока), а также для аварийного освещения магазинов, административных зданий и т.п. с питанием от аккумуляторных батарей.

Одним из важнейших достоинств люминесцентных ламп низкого давления является возможность получения света практически лю-

бого спектрального состава при высокой световой отдаче. Наиболее широкое распространение получили лампы, имитирующие естественный свет в различных вариантах. В настоящее время почти всеми производителями светотехнической продукции выпускаются лампы четырех – пяти основных цветовых тонов. При этом сложилась практика применения двух типов спектрального распределения ламп каждого цветового тона. Это лампы с высокой световой отдачей, которые применяются в большинстве случаев в системах общего освещения. В таких системах важна именно высокая световая отдача ламп, а их цветопередача не имеет особого значения. Другие лампы тех же цветовых тонов обладают улучшенным спектром излучения, но при этом имеют меньшую световую отдачу. Указанные лампы предназначены для освещения помещений, к которым предъявляются повышенные требования по цветопередаче. Электрические и геометрические параметры этих ламп одинаковые, но поскольку лампы с улучшенной цветопередачей менее экономичны, чем лампы стандартных цветов, применять их следует только в тех случаях, когда это требуется по условиям освещения.

В мировой практике нет единой системы маркировки газоразрядных ламп вообще и люминесцентных ламп в частности. Российские производители в маркировку ламп с улучшенными цветовыми характеристиками последней вводят букву Ц (например, ЛДЦ, ЛЕЦ и т.д.). Другие производители используют названия, например, «*du-luxe*» и «*lumilux*».

В настоящее время основным люминофором, применяемым для ламп с высокой световой отдачей и невысоким качеством цветопередачи, является галофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем (галофосфатные люминофоры – ГФК) [6]. Анализ распределения светового потока по восьми спектральным зонам для ламп стандартных цветов показывает, что для всех типов ламп с таким люминофором характерен недостаток излучения в красной (длина волны 610 – 660 и 660 – 760 нм) и сине-голубой (440 – 460 и 460 – 510 нм) и некоторый избыток в фиолетово-синей (420 – 440 нм) и желто-зеленой (560 – 610 нм) зонах спектра, что приводит к некоторому искажению цветопередачи. При освещении такими лампами красные и сине – голубые цвета теряют свою насыщенность, желто – оранжевые приобретают зеленоватый оттенок, а сине-фиолетовый. В лампах типов ЛД и ЛХБ, имеющих относитель-

но высокие значения цветовой температуры и сравнительно большое содержание синих излучений, в основном сказывается недостаток излучения в красной части спектра. У ламп типов ЛБ и ЛТБ с относительно низкой цветовой температурой цветопередача недостаточно удовлетворительна не только в красной части спектра, но и в сине-голубом. В связи с этим для освещения общественных жилых помещений, предприятий торговли разработаны лампы типа ЛЕЦ. Эти лампы обеспечивают наилучшую цветопередачу кожи человека и предметов домашнего обихода. Для освещения квартир, кафе, ресторанов могут применяться лампы типа ЛТБЦ, которые создают «теплое» освещение, подобное освещению традиционными лампами накаливания. Для медицинских учреждений выпускаются специальные лампы типа ЛХЕЦ. Эти лампы обеспечивают хорошую цветопередачу не только кожи человека, но и патологические изменения цвета кожи и крови.

Некоторые производители вводят свою собственную маркировку, учитывающую вышеперечисленные особенности цветопередачи и назначения ламп.

В лампах, обладающих улучшенными цветовыми характеристиками, применяются люминофоры с узкополосными спектрами излучения. Доказано [6], что за счет оптимизации спектров излучения люминофоров световая отдача ламп может быть существенно увеличена, либо может быть значительно повышен общий индекс цветопередачи при сохранении световой отдачи на соответствующем уровне. Составляя смеси из узкополосных люминофоров в различных пропорциях и комбинациях, можно получать лампы с различными спектрами и цветовыми температурами. Однако следует иметь в виду, что такие люминофоры значительно дороже галофосфатных.

Люминофор оказывает влияние на пульсации светового потока ламп. В люминесцентных лампах благодаря послесвечению люминофора пульсации светового потока ослаблены по сравнению с пульсацией излучения чисто ртутного разряда. Они определяются длительностью послесвечения люминофора и различаются в зависимости от типа применяемого люминофора. Например, коэффициент пульсаций одиночной лампы типа ЛБ при питании ее от сети частотой 50 Гц по стандартной схеме с дросселем составляет около 23 – 25%, ЛХБ – 35%, ЛД – 55%, ЛДЦ и ЛЕЦ – 70 – 72%.

Газоразрядные лампы высокого давления имеют сходные конструкции и состоят из кварцевой трубки (горелки), в которую впаяны два основных вольфрамовых электрода, покрытых активированным слоем и подсоединенных к центральной части цоколя лампы. После откачки воздуха горелка заполняется чистым инертным газом (аргоном). Горелка помещена в наружную стеклянную колбу, которая наполняется смесью инертных газов (аргон и азот) для предотвращения окисления вводов в горелку.

Благодаря наличию внешней колбы, светотехнические характеристики ламп практически не чувствительны к температуре окружающего воздуха в отличие от люминесцентных ламп низкого давления. Они надежно работают при температуре окружающего воздуха от -30 до $+40$ °С. Влияние температуры окружающего воздуха сказывается в основном на напряжении зажигания лампы и времени ее разгорания.

Лампы включаются через индуктивные ПРА, потери мощности в которых составляют около 10 %. Коэффициент мощности комплекта «лампа – ПРА» составляет в среднем 0,5. В последнее время наметилась тенденция встраивания в ПРА конденсаторов для повышения коэффициента мощности до 0,9–0,95 [7].

Дуговая ртутная люминесцентная (ДРЛ) лампа кроме основных, имеет два дополнительных электрода (зажигающие), соединенные с противоположными основными электродами через резисторы. Такая конструкция позволяет зажигать эти лампы на сетевом напряжении. В разрядную трубку добавляется ртуть (25–165 мг). Внутренняя поверхность наружной стеклянной колбы покрыта тонким слоем люминофора, способного преобразовывать ультрафиолетовое излучение, сопровождающее дуговой разряд в трубке, в видимый свет, пригодный для освещения.

Четырехэлектродные дуговые ртутные люминесцентные лампы высокого давления с люминофорным покрытием на колбе выпускаются мощностью в пределах 80–2000 Вт и имеют световую отдачу 40–60 лм/Вт. Световая отдача возрастает с увеличением единичной мощности. Однако для наиболее применяемых в установках внутреннего освещения ламп мощностью 400–1000 Вт данный показатель практически одинаков.

Срок службы ламп равен 12–20 тыс. ч, причем к концу этого срока световой поток снижается до 70 % от начального значения.

Лампы имеют резьбовой цоколь типа *E* диаметром 27 и 40 мм. Преимуществом ламп ДРЛ по сравнению с люминесцентными лампами низкого давления является их компактность при высокой единичной мощности, существенным недостатком – плохая цветопередача их излучения, позволяющая применять лампы ДРЛ только при отсутствии каких-либо требований к различению цветов ($T_c = 3800 \text{ K}$, $R_a = 42$), а также значительные пульсации светового потока (коэффициент пульсации 63–74 %). Процесс разгорания ламп после включения длится 5–7 мин. В случае хотя бы мгновенного перерыва питания лампы гаснут и начинают вновь разгораться только после остывания, когда пары ртути сконденсируются и давление в разрядной трубке упадет до первоначального значения (в течение примерно 10 мин). Как и люминесцентные лампы, они надежно работают только при напряжении не менее 90 % от номинального. Гигиенические исследования не выявили противопоказаний для применения ламп ДРЛ, но позволили сделать вывод, что при зрительных работах высокой точности применение их нежелательно.

В маркировке типов ламп буквы и числа обозначают: ДР – дуговая ртутная, Л – люминесцентная, первое число – номинальная мощность в ваттах, в скобках указывается так называемое красное отношение, в процентах (доля излучения в красной части спектра в общем потоке излучения), через дефис – номер разработки.

Лампы типа ДРЛ с красным отношением 6 % рекомендуется использовать для освещения улиц и автострад, 10 % – для наружного и внутреннего освещения промышленных объектов с высоким уровнем зрительных работ, 12 % и более – для внутреннего освещения промышленных предприятий [7].

Для освещения помещений производственных и общественных зданий, в которых выполняются работы, требующие повышенного цветоразличения, могут применяться лампы типа ДРЛ мощностью 50, 80 и 125 Вт, имеющие долю красного излучения 15 %

В лампах типа ДРВ (дуговая ртутная с вольфрамовой спиралью) вольфрамовая спираль включается последовательно с разрядной трубкой высокого давления, которая используется в качестве дополнительного источника излучения в красной части спектра, а также выполняет роль балластного устройства. Разрядная ртутная лампа и вольфрамовая спираль монтируются в общей стеклянной колбе с обычным резьбовым цоколем. Лампа включается непосред-

ственно в сеть без дросселя, поэтому иногда ее называют лампой прямого включения. По сути это ртутно-накальная лампа высокого давления. Световая отдача таких ламп значительно ниже, чем у ламп типа ДРЛ, и составляет 18 – 20 лм/Вт. Ртутно – накальные лампы в сочетании с красным люминофором, который преобразует ультрафиолетовое – излучение ртутно – кварцевой горелки в видимый свет, имеют световую отдачу около 30 лм/Вт. Люминофор наносится на внутреннюю поверхность наружной колбы. Пульсации светового потока составляют 70 – 90%.

Металлогалогенные лампы (МГЛ) типа ДРИ (дуговые ртутные с излучающими добавками) появились в результате развития и совершенствования ламп ДРЛ. В лампах типа ДРИ в разрядную трубку помимо ртути и аргона (или другого инертного газа) дополнительно вводят галоидные соединения различных металлов (обычно с йодом, так как иодиды металлов практически не взаимодействуют с кварцевым стеклом). Излучаемый свет зависит от используемого металла, что позволяет отказаться от люминофора.

Металлогалогенные лампы также могут иметь конструкции, оснащаемые цоколями типа RX7s, G12 и др. Лампы ДРИ имеют световую отдачу до 90 лм/Вт, включаются в сеть через ПРА, состоящие из дросселя и зажигающего устройства, генерирующего импульсы высокого напряжения. Пульсации светового потока и время разгорания лампы ДРИ значительно меньше, чем лампы ДРЛ (коэффициент пульсации 40 %, время разгорания 2 – 5 мин.). Срок службы для разных типов ламп составляет от 3 до 10 тыс. часов. С точки зрения применения металлогалогенные лампы разделяются на лампы для общего освещения, лампы с улучшенным качеством цветопередачи для общего и специального применения, а также лампы для специальных применений (например, для цветного телевидения).

Лампа типа ДНаТ подобно лампе ДРИ загорается от импульсного зажигающего устройства и разгорается примерно в течение 5 минут. В отличие от ламп ДРЛ и ДРИ повторное зажигание погасшей лампы происходит значительно быстрее, менее чем через 1 минуту после подачи на нее напряжения. Эти лампы требуют соблюдения установленного положения горения: цоколем вверх или вниз с нормированным отклонением от вертикального положения [7].

Световая отдача ламп достигает 140 лм/Вт при сроке службы до 20 000 ч. Цветовые характеристики натриевых ламп высокого давления относительно невысокие: лампа излучает свет желто-оранжевого цвета ($T_c = 2000$ К) и обладает плохой цветопередачей ($R_a = 20-30$). Улучшение качества цветопередачи при использовании натриевых ламп может быть достигнуто за счет их совместного применения с ртутными люминесцентными лампами высокого давления.

Ведущими мировыми производителями светотехнической продукции выпускаются также натриевые лампы, обладающие улучшенными цветовыми характеристиками. Однако они менее экономичны.

Кроме ламп ДНаТ с трубчатыми прозрачными наружными колбами разработаны специальные лампы ДНаТ в эллипсоидных колбах. Они могут использоваться в светильниках для ламп ДРЛ без изменений светооптической и электрической частей этих светильников. Мощности этих ламп уменьшены настолько, чтобы их рабочие токи допускали работу с дросселями от ламп ДРЛ без перегрева дросселей. Поскольку световой поток этих ламп больше, чем ламп ДРЛ, в светильнике может устанавливаться лампа ДНаТ меньшей мощности. Так, для замены лампы ДРЛ мощностью 250 Вт разработаны натриевые лампы высокого давления мощностью 210 Вт, соответственно лампы мощности 400 Вт заменяются лампами 350 – 360 Вт. Большинство ламп этого типа имеет встроенное зажигающее устройство [6].

Ксеноновые лампы предназначены для освещения больших открытых пространств (карьеров, мостов, погрузочно-разгрузочных площадок), архитектурных сооружений и т. д.

В дуговых ксеноновых трубчатых лампах дуговой разряд происходит в тяжелом инертном газе ксеноне. В результате этого испускаются лучи в близкой к ультрафиолетовой, видимой и близкой к инфракрасной областям спектра электромагнитного излучения. Излучаемый свет имеет ровный белый цвет ($T_c = 6000$ К) и хорошую цветопередачу ($R_a = 98$). Различают ксеноновые лампы с естественным и водяным охлаждением (трубчатые), а также сверхвысокого давления с естественным и принудительным воздушным или водяным охлаждением (шаровые).

Сортамент включает лампы мощностью 5, 10, 20 и 50 кВт (в большом количестве выпускаются также лампы 100 кВт). Срок службы различных типов ламп имеет пределы 100–800 ч, но при стабилизации напряжения, обеспечивающей отклонение от номинального значения $\pm 2\%$, может достигать 3000 ч. Лампы мощностью до 10 кВт включаются на напряжение 230 В, более мощные – в сеть напряжением 400 В. Для ламп типа ДКсТ мощностью 10, 20 и 50 кВт положение горения должно быть горизонтальное с отклонением от него $\pm 30^\circ$, а для остальных ламп – любое. Область применения ламп ограничивается вредным для людей избытком в их спектре ультрафиолетовых излучений. Выпускаются также лампы в колбе из легированного кварца (лампы ДКсТЛ), в которых этот недостаток устранен [7]. Пульсации светового потока у ламп ДКсТ особенно велики (коэффициент пульсации 130 %). Помимо большой единичной мощности, достоинством ламп является тот факт, что их излучение по цветности наиболее близко к естественному дневному свету, хотя по сфере применения ламп это достоинство обычно не реализуется. Температура внешней среды не оказывает существенного влияния на зажигание и горение лампы.

В отличие от других газоразрядных ламп эти лампы работают без балласта в виде ПРА, а зажигаются с помощью специального пускового устройства.

Светодиоды (СД) в англоязычных литературных изданиях обозначаются аббревиатурой *LED* (*light emitting diode* - светоизлучающие диоды). Принцип действия светодиодов, как полупроводниковых приборов, основан на преобразовании электрической энергии непосредственно в световое излучение. В полупроводниковых материалах электроны имеют непрочную связь с атомами. При тепловом, световом или электрическом воздействии эта связь разрывается, в результате чего появляются свободные электроны, и электрическая проводимость материала резко увеличивается. При потере электрона на орбите появляется пустое место, так называемая "дырка", вследствие чего атом превращается в положительный ион. В полупроводниках "дырки" также являются носителями электрического тока, т.е. имеет место не только электронная, но и "дырочная" проводимость. Для заполнения пустого места на орбите положительный ион стремится захватить электрон из ближайшего соседнего атома, в котором создается новая "дырка". В результате таких

последовательных действий "дырка", а, следовательно, положительный заряд, движется. Процесс соединения электрона с "дыркой" называется рекомбинацией.

Следует отметить, что один и тот же полупроводниковый материал может обладать как электронной, так и "дырочной" проводимостью. Например, если в материал добавить примеси с большим количеством электронов, то имеет место электронная проводимость n -типа (n - от латинского слова *negativus* - отрицательный). Добавка в полупроводник некоторых металлов приводит к избытку дырок в полупроводниковом материале, что обуславливает "дырочную" проводимость p -типа (p - от латинского слова *positivus* - положительный).

В кристалле светодиода искусственно создаются две области, противоположные по электрической проводимости, что достигается применением разных полупроводниковых материалов. Разделяющая их границы область называется p - n -переходом.

Если подключить светодиод к источнику постоянного напряжения плюсом к контакту p , а минусом - к n , то через светодиод будет протекать электрический ток. При прохождении электронов через зону p - n перехода (активная зона p - n перехода) электроны рекомбинируют (соединяются) с "дырками". Для производства светодиодов используются материалы, в которых рекомбинация носит не тепловой, а излучательный характер, то есть энергия, выделяемая при рекомбинации, расходуется не на нагревание материала полупроводника, а на излучение фотона в оптическом спектре. В случае безизлучательной рекомбинации энергия расходуется на нагревание.

Эффект излучения фотонов называется инжектированной электролюминесценцией [8]. При этом длина волны светового излучения, т.е. его цвет, зависит в основном от химического состава используемых полупроводниковых материалов. Важнейшими материалами, применяемыми в светодиодах, являются алюминий, галлий, индий, фосфор, которые используются для получения светового излучения в диапазоне от красного до желтого с длиной волны $\lambda = 760 - 560$ нм. С помощью индия, галлия и азота получают зеленое, голубое и синее свечение ($\lambda = 560 - 450$ нм). Добавление люминофора к кристаллу, вызывающему голубое свечение, позволяет получить светодиод с белым цветом светового излучения.

Усиления яркости свечения светодиодов добиваются введением в полупроводниковые материалы специальных добавок и присадок, а также применением гетероструктур, что позволяет реализовать в одном кристалле множество $p-n$ - переходов.

Зона, в которой рекомбинируют электроны и "дырки", называется запрещенной. От ее ширины, то есть от материала полупроводника и от легирующих примесей, зависит цвет излучаемого светодиодом света.

Светодиоды имеют разное конструктивное исполнение. Основой светодиодов являются полупроводниковые кристаллы, в которых реализованы $p-n$ - переходы. Кристаллы могут иметь размеры от 0,18 до 1 мм [9]. Одним из вариантов исполнения светодиода является следующий: кристалл помещается в медную или алюминиевую полированную чашечку, которая служит светоотражателем и катодом. Непосредственно к кристаллу с помощью сварки или токопроводящего клея присоединяют тонкую токопроводящую нить, являющуюся анодом. Полученную конструкцию заливают прозрачным полимерным материалом (например, эпоксидной смолой, силиконом и т. п.), которому придают определенную форму. Полимерное герметизирующее покрытие защищает полупроводниковые элементы от воздействия окружающей среды. Характер распределения света в пространстве в значительной степени определяется конструкцией светодиода. При выпуклой поверхности полимерного покрытия в виде линзы световое излучение обеспечивает большую силу света в осевом направлении с небольшим углом обзора ($8-60^\circ$), т.е. свет с помощью линзы собирается в узкий пучок (рис. 1.1,а). При плоской поверхности светодиода свет излучается широким пучком с большим углом обзора ($120 - 130^\circ$), но интенсивность излучения в осевом направлении будет ниже (рис. 1.1,б). Она изменяется обратно пропорционально величине угла излучения. Каждая из этих конструкций светодиода находит свое применение в тех или иных устройствах.

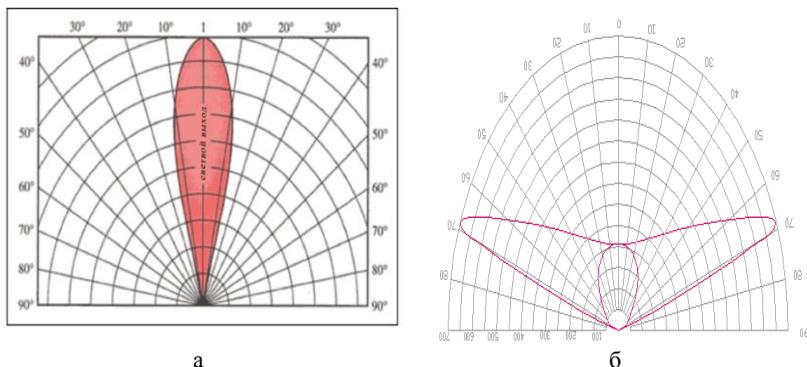


Рис. 1.1. Диаграмма направленности светодиодов
 а – при выпуклой поверхности светодиода;
 б – при плоской поверхности светодиода.

Оптические характеристики светодиодов зависят от температуры. При повышении температуры в зоне $p-n$ - перехода характеристики светодиодов ухудшаются. Поэтому должен быть обеспечен эффективный отвод теплоты от кристалла. Например, для сверхярких светодиодов, рассчитанных на большие токи, требуется массивный медный или алюминиевый теплоотвод.

Применительно к светодиодным устройствам, работающим при температуре окружающей среды T_A , надо различать температуру, измеренную в разных точках: в области $p-n$ перехода – T_J , подложки – T_S , монтажной платы – T_B (рис.1.2) [10]. В условиях нормальной эксплуатации $T_J \geq T_S \geq T_B \geq T_A$.

Основными показателями светодиодов, определяющими их эффективность, являются квантовый выход, коэффициент полезного действия, долговечность и световая отдача.

Под квантовым выходом понимается количество излученных квантов света на одну рекомбинировавшую электронно-дырочную пару, выраженное в процентах. Различают внутренний и внешний квантовый выход.

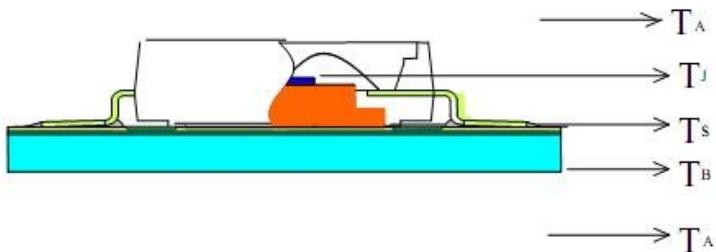


Рис. 1.2. Температура в разных элементах светодиодного устройства

Внутренний – это характеристика самого р-п-перехода, его конструкции и материала, внешний квантовый выход определяет характеристику прибора в целом. Разница между внутренним и внешним квантовым выходом обусловлена потерями в материале светодиода. Внутренний квантовый выход для кристаллов с хорошим теплоотводом приближается к 100%. Максимальное значение внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих – 35%. Внешний квантовый выход – одна из основных характеристик эффективности светодиода.

Коэффициент полезного действия (КПД) также является показателем эффективности использования светодиодом электрической энергии. КПД может быть приближенно определён через значение энергии кванта света в спектральном максимуме. У светодиодов КПД достигает 90%, в то время как у ламп накаливания этот показатель составляет около 10%, а у газоразрядных ламп низкого давления – около 25%.

Срок службы светодиодов достигает 100 тыс. часов и значительно превышает долговечность других источников света.

По достигнутым значениям световой отдачи светодиоды давно обогнали лампы накаливания и вплотную приблизились к люминесцентным лампам. Так, созданы светодиоды белого цвета со светотдачей 80 лм/Вт, цветовой температурой $T_c = 6000 - 8500$ К и общим индексом цветопередачи $R_a = 80$, а цветные (красные) - со световой отдачей 50 лм/Вт.

Для светодиодов, как источников света, весьма важным является правильное их включение. СД - это полупроводниковый прибор,

поэтому при его включении в цепь необходимо соблюдать полярность. Устройство имеет два вывода, один из которых катод ("минус"), а другой - анод ("плюс"). В рабочем состоянии светодиод будет находиться только при прямом включении, как показано на рисунке 1.3. В случае обратного включения светодиод света не излучает.

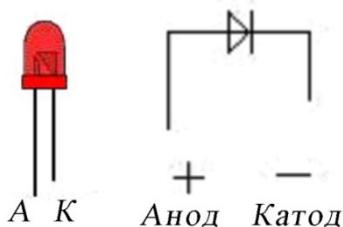


Рис. 1.3. Схема включения СД

На рисунке 1.4 приведена вольтамперная характеристика светодиода, отражающая зависимость тока от подведенного напряжения.

Для каждого СД существуют допустимые значения напряжения питания U_{max} и $U_{max\text{ обр}}$ (соответственно для прямого и обратного включений). При подаче напряжений свыше этих значений наступает электрический пробой, в результате которого светодиод выходит из строя. Существует и минимальное значение напряжения питания U_{min} , при котором наблюдается свечение светодиода. Диапазон питающих напряжений между U_{min} и U_{max} называется "рабочей" зоной, в которой осуществляется работа светодиода.

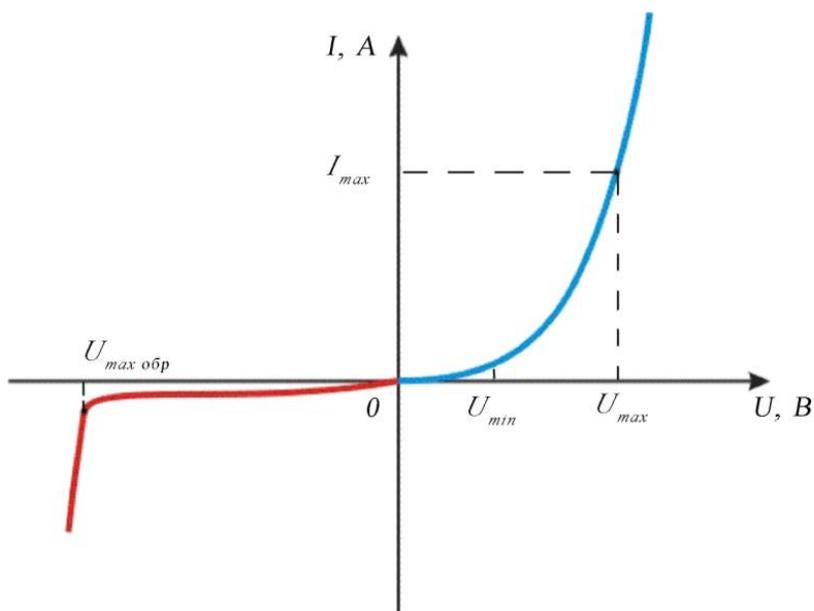


Рис. 1.4. Вольтамперная характеристика светодиода

1.3. Анализ основных показателей, характеризующих эффективность источников света

В Беларуси для светильников наружного и производственного освещения установлены три класса энергетической эффективности – *A*, *B* и *C*. Требования к установлению этих классов приведены в ГОСТ 8045-82 «Светильники для наружного освещения. Общие технические условия» и ГОСТ 15597-82 «Светильники для производственных зданий. Общие технические условия». Для светильников общественного и бытового назначения показателями энергоэффективности являются их потребляемая мощность и КПД, которые устанавливаются согласно ГОСТ 8607-82 «Светильники для освещения жилых и общественных помещений. Общие технические условия». В соответствии с белорусскими стандартами в наружных и промышленных светильниках класса *A* могут использоваться как газоразрядные лампы, так и лампы накаливания.

Суть маркировки энергоэффективности состоит в том, что на основе анализа и тестирования энергопотребления в группе продуктов (или установок) каждому(ой) из них присваивается определенный индекс энергоэффективности, фиксируемый в технической документации. Кроме того, этот индекс наносится на изделие в виде красочной этикетки.

В целях унификации шкала энергоэффективности для всех групп маркируемых продуктов разбивается на несколько классов. Следует подчеркнуть, что даже в одной группе изделий наблюдается большое разнообразие свойств, влияющих на энергопотребление: размеры, мощность, режимы работы и т.п. Поэтому особая задача состоит в том, чтобы выработать критерии и регламенты тестирования на энергопотребление различных сходных групп продуктов. В частности, в странах ЕС предусмотрено семь классов энергоэффективности (КЭЭ) от *A* до *G* с фиксированным диапазоном относительных показателей в каждой группе. Для обозначения вводятся буквенные индексы от *A* (самый энергоэффективный) до *G* (самый высокий уровень энергопотребления). Светодиодные, люминесцентные и энергосберегающие лампы обычно относятся к классу *A* и *B*, галогенные – преимущественно к классам *C* и *D*, лампы накаливания – *E* и *F*.

Введение маркировки энергоэффективности является обязательным требованием в странах ЕС и регламентируется Директивой 2005/32/ЕС Европейского парламента.

Принятая в Беларуси классификация энергоэффективности светильников не соответствует классификации, действующей в Евросоюзе. Данная классификация используется белорусскими производителями при поставке на экспорт промышленных изделий.

Государственный сектор Беларуси до конца 2020 года планирует избавиться от светильников с энергоэффективностью ниже класса *A* [11]. Переход на экономичные светильники будет осуществляться поэтапно в соответствии со специальными графиками, которые разработаны по поручению правительства всеми республиканскими органами госуправления, подчиненными правительству госорганизациями, облисполкомами и Минским горисполкомом и утверждены по согласованию с департаментом по энергоэффективности. Уже в 2013 году планируется внедрить 139 970 таких светильников, в том числе 117 417 штук для производственных зданий, 22 553 –

для наружного освещения. Всего в республике до 2020 года будет введено в эксплуатацию почти 717 тыс. светильников с классом энергоэффективности не ниже класса А, в том числе почти 595 тыс. штук для производственных зданий, более 122 тыс. штук – для наружного освещения.

В таблице 1.2 представлены некоторые характеристики основных групп источников света, главной из которых является показатель удельной световой энергии, вырабатываемой за срок службы. Если величину световой энергии от лампы накаливания принять за единицу, то можно видеть, что все остальные типы ламп многократно (в разы или даже на порядок) вырабатывают больше световой энергии.

В ряде случаев при оценке эффективности источника света используется мультипликативный критерий удельной световой энергии, вырабатываемой источником света за срок его службы, представляющий собой произведение световой отдачи H и средней продолжительности работы лампы T_d , выраженный в лм·ч/Вт:

$$J = H \cdot T_d.$$

Данный критерий позволяет более объективно оценить эффективность применения того или иного типа электрической лампы.

Таблица 1.2.

Характеристики источников светового излучения по энергетической экономичности и сроку службы

| Тип источника света | Световая отдача, лм/Вт | Продолжительность горения, ч | Среднее значение J | |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|----------|
| | | | Млм·ч/Вт | отн. ед. |
| Лампы накаливания | | | | |
| Лампы накаливания общего назначения | 10 -20 | 1000 | 0,015 | 1 |

| | | | | |
|---|----------|-------------------|-----------|-----|
| Лампы нака- ливания га- логенные | 22 - 30 | 2000 – 4000 | 0,078 | 5 |
| Газоразрядные лампы низкого давления | | | | |
| Люминес- центные лампы низко- го давления | 47 – 104 | 12000 - 15000 | 1,019 | 68 |
| Компактные люминес- центные лампы | 48 – 75 | 6000 - 12000 | 0,554 | 37 |
| Газоразрядные лампы высокого давления | | | | |
| Металлога- логенные лампы типа ДРИ | 74 - 100 | 3000 - 10000 | 0,566 | 38 |
| Дуговые ртутные лам- пы типа ДРЛ | 36 - 60 | 12000 - 20000 | 0,768 | 51 |
| Натриевые лампы высо- кого давле- ния типа ДНаТ | 80 - 125 | 6000 - 15000 | 1,076 | 72 |
| Ксеноновые трубчатые лампы | 18 - 45 | 100 - 800 | 0,01 4 | 0,9 |
| Источники света на основе светодиодов | | | | |
| СД | 25 – 80 | 50000 - 100000 | 3,94 | 263 |

Как видно из таблицы 1.2, с учетом продолжительности срока службы наиболее эффективными являются источники света на основе светодиодов. Сегодня самое перспективное и интересное направление, в котором работает огромное количество фирм, где достижения меняются буквально на глазах, – светодиоды.

Световые приборы, использующие светодиоды, позволяют достичь существенной экономии электроэнергии по сравнению с традиционными источниками света. Такие приборы можно эффективно использовать для освещения различных коммунальных и производственных объектов. Например, их можно применять для аварийного освещения, освещения общедомовых и других помещений жилищно-коммунального хозяйства, вспомогательных помещений промышленных предприятий, подземных переходов и автомобильных стоянок, для архитектурного освещения зданий, в садово-парковом освещении и т.п. Светодиодные источники света не представляют серьезной опасности с экологической точки зрения и легче утилизируются. Однако высокая стоимость и определенная консервативность потребителей светотехнической продукции сдерживает их широкое применение в осветительных установках.

Лампы типа ДРИ, имеющие высокую световую отдачу и лучшую цветопередачу по сравнению с лампами типа ДРЛ, в долгосрочной перспективе из-за меньшего срока службы и большей стоимости уступают им по эффективности применения.

На производственных объектах, в общественных зданиях и в системах наружного освещения в целях экономии электроэнергии повсеместно широко применяются газоразрядные источники света. Их эксплуатация осуществляется специалистами, которые после отработки ламп передают их в установленном порядке на специализированные предприятия для утилизации. В то же время в домах, квартирах, гаражах, на дачах и на других объектах частной собственности жителей городов и сельской местности все большее применение находят газоразрядные лампы, в частности, компактные люминесцентные лампы, предназначенные для непосредственной замены ламп накаливания. Это, несомненно, положительно сказывается на экономии электроэнергии. Однако при применении газоразрядных ламп бытовыми потребителями электроэнергии необходимо учитывать некоторые аспекты,

касающиеся их эффективного и безопасного использования, а также утилизации.

Компактные люминесцентные лампы значительно дороже ламп накаливания, эквивалентных им по световому потоку. И все же при обеспечении того же уровня освещенности в долгосрочной перспективе компактные лампы применять значительно выгоднее из-за меньшей потребляемой мощности (примерно в пять раз) и большей продолжительности горения. При этом они должны обладать высокими светотехническими характеристиками и заявленным производителем средним числом часов работы. В противном случае снижается экономический эффект от внедрения энергосберегающих мероприятий. Более того, для рядового покупателя эффект может быть даже отрицательным, так как снижение в оплате за электроэнергию может не покрывать расходов на приобретение лампы.

По сравнению с лампами накаливания компактные люминесцентные лампы представляют собой более сложный источник света, содержащий пусковое устройство и стеклянную колбу, наполненную парами ртути. В одной лампе содержится от трех до пяти миллиграмм ртути. Этого количества ртути достаточно, чтобы при повреждении лампы в стандартном помещении без проветривания предельно допустимая концентрация ртути кратковременно была превышена более чем в 160 раз. Напомним, что по гигиенической классификации ртуть относится к чрезвычайно опасным химическим веществам. Покупателей ламп, содержащих ртуть, надо информировать об этом, а также о необходимых действиях после выхода ламп из строя. Для этого на упаковке компактных люминесцентных ламп следует помещать соответствующую информацию. Недопустимо выбрасывать люминесцентные лампы вместе с бытовым мусором, так как это приводит к опасному заражению ртутью окружающей среды. Отметим, что загрязняют окружающую среду также электронные элементы пусковых устройств газоразрядных ламп.

Одним из возможных способов снижения опасности попадания ртути в окружающую среду является создание инфраструктуры по централизованному сбору компактных люминесцентных ламп с последующей их утилизацией на специальных установках.

Применение компактных люминесцентных ламп приводит к экономии денежных средств пользователей только при длительном сроке службы, который зависит от частоты включения и отключения светового прибора. Следует учитывать, что на надежность работы пускорегулирующего устройства лампы неблагоприятно сказываются частые включения и отключения. При выполнении последовательности операций «включение-отключение» в течение суток более десяти раз срок службы энергосберегающей лампы снижается. Таким образом, необходимо иметь в виду, что в помещениях с периодическим пребыванием людей (туалет, ванная комната, кухня и т.п.) данные лампы, экономя электроэнергию, не всегда смогут работать в течение срока, заявленного производителем.

Отметим, что выпускаются также компактные люминесцентные лампы, предназначенные для применения в светильниках наружного освещения. Их применение также обеспечивает значительную экономию электроэнергии.

1.4. Осветительные установки и их основные элементы

Осветительной установкой называется электротехническая установка, предназначенная для электрического освещения объектов разного назначения (промышленных, коммунально-бытовых, сельскохозяйственных и др.). В ее состав входят световые приборы (СП), электропроводки и кабельные линии напряжением до 1 кВ, осветительные щитки с аппаратами защиты и коммутации, технические средства управления электрическим освещением.

В соответствии с ГОСТ 16703–79 световым прибором называют устройство, содержащее одну или несколько источников света и светотехническую арматуру, перераспределяющую их свет или преобразующую структуру света и предназначенное для освещения или сигнализации. Необходимость помещения источника света внутри светотехнической арматуры вызвана тем, что без нее открытая лампа излучает световой поток равномерно во все стороны. Светотехническая арматура перераспределяет световой поток лампы, посылая его в нужном направлении. Соответствующая светотехническая арматура защищает также

источники света от неблагоприятных воздействий окружающей среды.

Различают следующие типы световых приборов:

светильник – световой прибор ближнего действия;

прожектор – световой прибор дальнего действия;

проектор – световой прибор, перераспределяющий свет лампы с концентрацией светового потока на поверхности с малым объемом или в малом объеме.

Для систем внутреннего и наружного освещения промышленных предприятий в качестве световых приборов, как правило, применяются светильники. Прожекторы используются в основном в наружных осветительных установках для освещения больших открытых пространств и архитектурных объектов. В световых приборах источниками света являются электрические лампы разных типов или светодиоды.

Обобщенная структурная схема светового прибора с газоразрядными лампами показана на рисунке 1.5

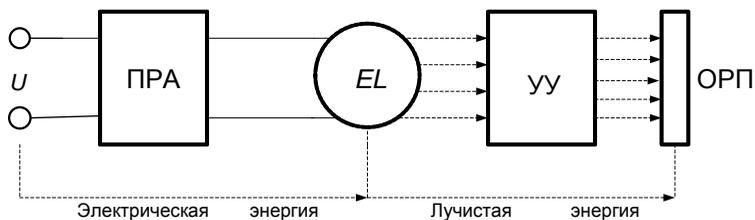


Рис. 1.5. Структурная схема светового прибора с газоразрядным источником света: ПРА – пускорегулирующий аппарат; EL – электрическая лампа; УУ – устройство управления световым потоком; ОРП – освещаемая рабочая поверхность.

Пускорегулирующий аппарат представляет собой устройство, с помощью которого осуществляется питание газоразрядной лампы, обеспечивается устойчивое зажигание источников света и нормальный режим их работы. При этом ПРА должны иметь небольшие массу и объем, малые потери мощности, невысокую стоимость и бесшумность в работе.

ПРА классифицируются по следующим основным признакам [16]:

- типу токоограничивающего элемента (подразделяются на электромагнитные (ЭМПРА), выполненные с использованием дросселей, конденсаторов, резисторов, трансформаторов, и электронные (ЭППРА), выполненные на базе полупроводниковых элементов);

- количеству источников света, с которыми могут работать ПРА (различают индивидуальные и групповые ПРА);

- виду входной энергии (ПРА подразделяются на аппараты, работающие от источника постоянного и переменного напряжения (одно- и многофазного));

- возможности регулирования светового потока (ПРА делятся на регулируемые и нерегулируемые);

- конструкции ПРА (могут выполняться встраиваемыми в световой прибор, интегрированными с источником света, а также быть независимыми);

- уровню шума (с нормальным, пониженным, низким и особо низким уровнем шума).

Основными функциями ПРА являются зажигание, разгорание и обеспечение устойчивой работы источников света. Для обеспечения устойчивой работы лампы в состав ПРА вводится токоограничивающий (балластный) элемент.

В настоящее время при разработке новых и модернизации устаревших световых приборов с газоразрядными лампами низкого давления применяются ЭПРА, с помощью которых осуществляется питание источников света на повышенной частоте до 40 кГц.

При питании ламп на повышенной частоте улучшаются их основные характеристики [17]:

- пульсация светового потока значительно снижается и на частоте 1000Гц и выше настолько мала, что стробоскопический эффект отсутствует;

- с ростом частоты до 20 кГц световая отдача источников света увеличивается примерно на 10 – 25%;

- срок службы ламп повышается на 20 - 30%;

- потери мощности в ПРА снижаются в 1,5 – 2 раза;

- ЭПРА допускают работу при входном напряжении постоянного тока, что часто требуется в системах аварийного освещения.

Кроме того, применение электронных пускорегулирующих аппаратов позволяет осуществлять регулирование светового потока. В связи с широким внедрением систем управления освещением такая возможность является актуальной.

Упрощенная структурная схема светового прибора на основе светодиодов приведена на рисунке 1.6.

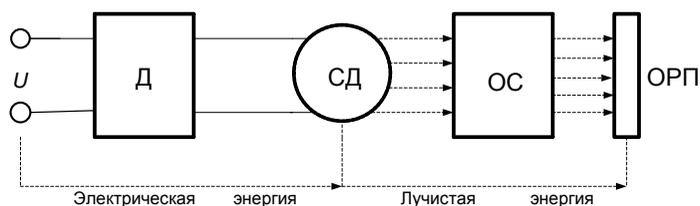


Рис.1.6. Структурная схема светового прибора со светодиодным источником света:
Д – драйвер, СД – светодиод, ОС – оптическая система.

Драйвер (источник питания) для светодиода предназначен для питания и управления работой, как отдельных светодиодов, так и групп светодиодов. Главное требование к драйверам – обеспечение протекания через СД стабилизированного номинального тока. Драйверы могут также выполнять задачи по регулированию яркости и другие сервисные функции (например, следить за разрядом аккумуляторов, используемых для питания СД).

Оптические характеристики светодиодов зависят от температуры. При повышении температуры в зоне $p-n$ – перехода характеристики светодиодов ухудшаются. Поэтому весьма важным, особенно для мощных светодиодов, является отвод теплоты в окружающую среду. Обеспечение температуры светодиодов в заданных пределах путем отвода тепла называется термоменеджментом. К вопросам термоменеджмента относится не только конструкция теплоотвода, но и конструкция всего корпуса. Наряду с обеспечением отвода тепла, важна автоматика, управляющая питанием светодиодов. Если обнаруживается, что светодиоды перегреты, а система охлаждения

уже не справляется, должна уменьшаться подаваемая на светодиоды мощность.

Световые приборы представляют собой однофазные электроприемники в трехфазных электрических сетях. Из-за относительно небольшой единичной мощности источников света (как правило, не более 2 кВт) в электрической сети путем правильной группировки светильников можно достичь достаточно равномерной нагрузки фаз (с несимметрией не более 5-10%). Электрические нагрузки освещения при включении источников света характеризуются малой изменчивостью во времени. Характер нагрузки равномерный, без толчков, но ее значение зависит от времени суток, года и географической широты местности.

При включении газоразрядных ИС имеют место пусковые токи. Для люминесцентных ламп низкого давления они незначительны и кратковременны. В тоже время лампы типа ДРЛ и ДРИ имеют кратность пускового тока по отношению к номинальному 1,6. При этом стабилизация рабочего тока происходит примерно через 250 с. Следовательно, частые включения световых приборов с такими источниками света приводят к дополнительному тепловому износу изоляции проводников электрических сетей осветительных установок.

С учетом того, что для освещения в основном применяются газоразрядные лампы, коэффициент мощности нагрузки световых приборов $\cos \varphi < 1$. При работе газоразрядных ламп в проводниках, особенно в нулевом рабочем N или нулевом совмещенном проводнике PEN , появляются токи высших гармоник.

Для обеспечения электроэнергией световых приборов необходимы электрические сети, которые условно делятся на питающие, распределительные и групповые. К питающей сети относятся линии, проложенные от шин напряжением до 1 кВ РУ трансформаторных подстанций (ТП) до вводно-распределительных устройств (ВРУ), вводных устройств (ВУ) или главных распределительных щитов (ГРЩ), к распределительной – от ВРУ, ВУ или ГРЩ до групповых щитков, а к групповой – линии от групповых щитков до светильников или розеток.

Электрическая часть осветительной установки в общем случае может состоять из звеньев, показанных в виде графа на рисунке 1.7.

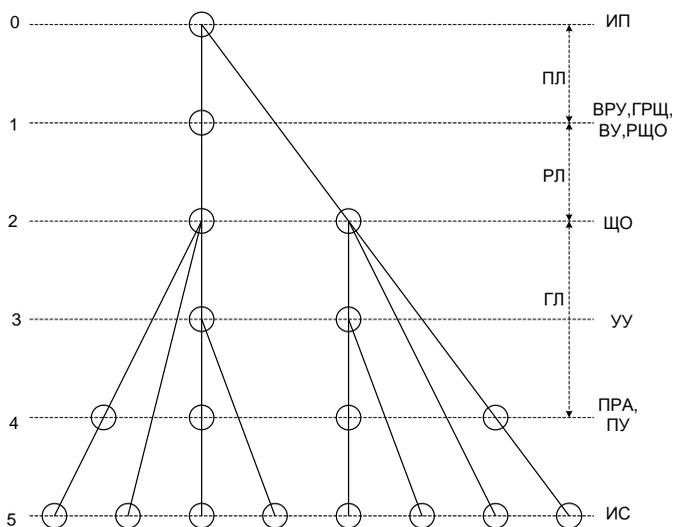


Рис. 1.7. Схема системы электрического освещения в виде графа:
 ИП – источник питания; ПЛ – питающая линия; РЛ – распределительные линии;
 ГЛ – групповые линии; ИС – источники света.

Как видно из рисунка 1.7, осветительные установки представляют собой многоуровневую систему (уровни 0 – 5). На каждом уровне применяются разные устройства, выполняющие определенные функции. Устройства электрически связаны изолированными проводами или кабелями. В некоторых случаях те или иные звенья сети освещения могут отсутствовать. В самом простейшем варианте групповые щитки могут питаться по линиям, отходящим непосредственно от распределительного щита подстанции или от магистрального шинпровода, т.е. без распределительных линий.

По мере удаления от ИП количество элементов системы электрического освещения возрастает. Подача электроэнергии к источникам света (электрическим лампам) может осуществляться разными путями (рис. 1.7), в состав которых входит определенный набор элементов системы электрического освещения, обладающих неодинаковой надежностью.

С точки зрения бесперебойности питания ИС более надежным является путь с меньшим числом элементов. Однако такой путь, как правило, не является эффективным с точки зрения экономичности. Распределительные устройства напряжением до 1 кВ ТП промышленных предприятий с трансформаторами мощностью 630 – 2500 кВ·А имеют ограниченное число автоматических выключателей с относительно большими номинальными токами. Это делает технически невозможным и экономически неоправданным подключение групповых ЩО непосредственно к РУ ТП, что вызывает необходимость применения РЩО. Наиболее энергоэффективные ИС требуют применения ПРА или ПУ, которые необходимы для функционирования световых приборов. В то же время ПРА и ПУ могут сами выходить из строя, снижая надежность электрических сетей освещения. Лампы накаливания, не требующие ПРА, на промышленных предприятиях вследствие низкой энергоэффективности практически не используются. На крупных промышленных предприятиях питание световых приборов чаще всего осуществляется по схеме 0-1-2-3-4-5 и 0-1-2-4-5. На относительно небольших производственных предприятиях могут применяться схемы 0-2-4-5 и 0-2-4-5.

Электрические сети осветительных установок имеют свою специфику. В отличие от силовых сетей, в которых осуществляется защита от сверхтоков (токов короткого замыкания и перегрузки) не только линий, но и отдельными аппаратами присоединенных к ним электроприемников, в осветительных установках световые приборы не имеют индивидуальных устройств защиты. Исключение составляют световые приборы с электронными ПРА. ЭПРА осуществляют защиту от перегрузки, отключают светильник при выходе лампы из строя и включают его после замены лампы, отключают световой прибор при выходе подведенного напряжения за пределы установленного диапазона.

При использовании для защиты групповой линии однополюсных автоматических выключателей отказ светового прибора, связанный с появлением сверхтока, приводит к отключению фазы линии, к которой он присоединен. Если для защиты линии от сверхтоков применяются трехполюсные автоматы, то отключается вся трехфазная линия. Это приводит к существенному снижению уровня освещенности в производственном помещении, ухудшению условий производства работ и даже к их прекращению.

Отказ в работе отдельного светового прибора или его элемента (ПРА, ПУ, ИС), не вызывающий сверхтока (например, перегорание или разрушение колбы лампы, обрыв электрических цепей из-за обгорания контактов и т.п.) приводит к снижению качества освещения в месте установки светового прибора. В случае разрушения ИС, содержащих ртуть (газоразрядные лампы высокого и низкого давления, компактные люминесцентные лампы), происходит загрязнение окружающей среды ртутью, представляющей серьезную опасность для здоровья людей. Это также можно рассматривать как нарушение надежности системы электрического освещения. В большинстве случаев отказ отдельного элемента, не приводящий к отказу всей осветительной установки, вызывает только снижение уровня освещенности в освещаемой рабочей зоне.

Наиболее тяжелые последствия в системе электрического освещения вызывают отказы элементов осветительных установок, приводящие к внезапному отключению питающих и распределительных линий. Кратковременные (на несколько секунд) аварийные перебои в электроснабжении осветительных установок, как правило, допустимы. На производствах, где длительные погасания ИС недопустимы, применяется резервирование питания. В помещениях, в которых отключение рабочего освещения угрожает безопасности людей, применяются специальные системы аварийного освещения.

Электрическая часть осветительной установки в общем случае может состоять из звеньев, показанных на рисунке 1.8 [18]. В некоторых случаях те или иные звенья сети освещения могут отсутствовать. В самом простейшем варианте групповые щитки питаются по линиям, отходящим непосредственно от распределительного щита подстанции.

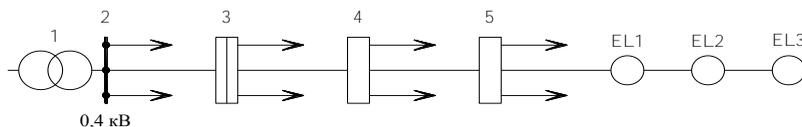


Рис. 1.8. Основные звенья электрической осветительной сети:

1 – трансформатор напряжением 10(6)/0,4 кВ; 2 – распределительный щит напряжением 0,4 кВ подстанции; 3 – ВРУ (ВУ, ГРЩ); 4 – распределительный (магистральный) щиток; 5 – групповой щиток освещения; $EL1 - EL3$ – световые приборы.

Питающие и распределительные сети освещения выполняются магистральными и радиальными кабельными линиями, которые обычно прокладываются по общим трассам с силовыми кабелями.

Групповые сети обычно представляют собой совокупность магистральных одно-, двух- и трехфазных линий. На рисунках 1.9 – 1.11 приведены схемы групповых линий в трехфазных электроустановках с глухо заземленной нейтралью с подключением световых приборов на фазное напряжение. В случае питания электрических ламп на междуфазном напряжении используются схемы, показанные на рисунке 1.12. При этом для защиты групповых линий от сверхтоков рекомендуется применять двух- и трехполюсные автоматические выключатели.

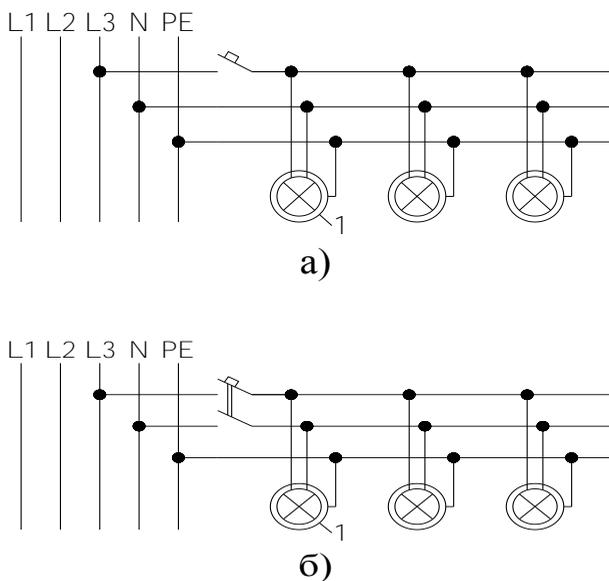


Рис. 1.9. Схемы однофазных групповых линий при трехфазной системе с нулевыми проводниками:

а – с однополюсным автоматическим выключателем; б – с двухполюсным автоматическим выключателем, применяемая во взрывоопасных зонах класса В-1; $L1, L2, L3$ – фазные проводники; N – нулевой рабочий проводник; PE – нулевой защитный проводник; 1 – корпус светильника.

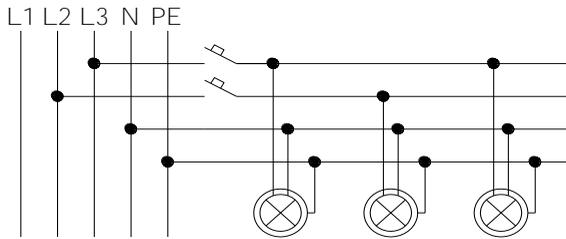


Рис. 1.10. Схема двухфазной групповой линии при трехфазной системе с нулевыми проводниками

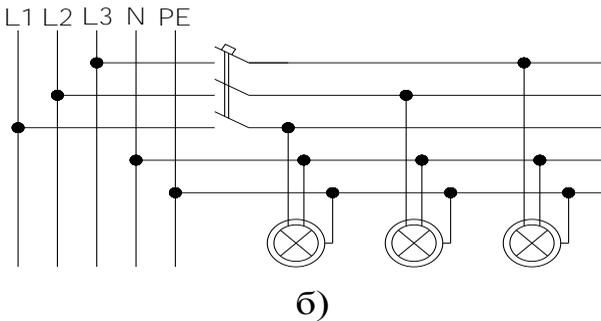
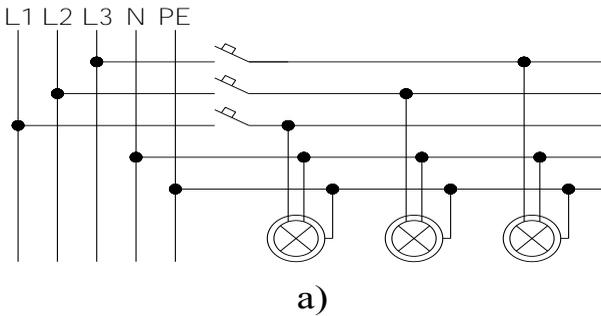


Рис. 1.11. Схема трехфазных групповых линий с нулевыми проводниками:
 а – с применением однополюсных автоматических выключателей;
 б – с применением трехполюсных автоматических выключателей.

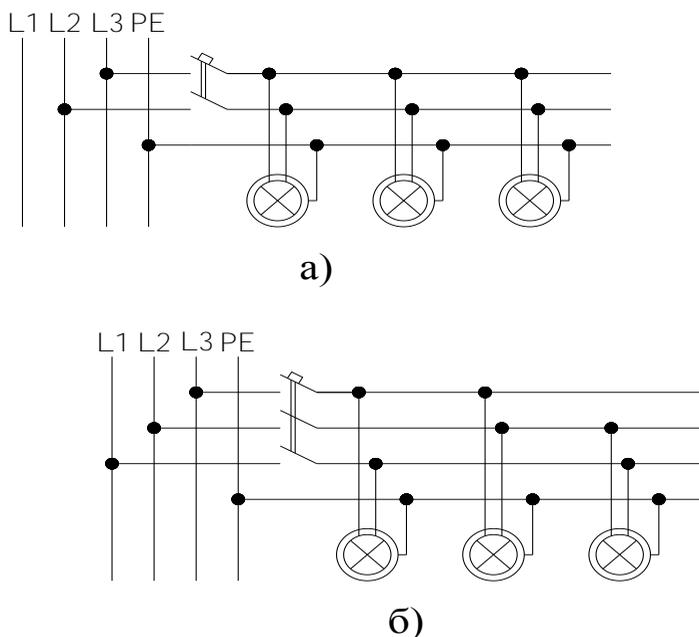


Рис. 1.12. Схемы групповых линий при трехфазной системе без нулевого рабочего проводника:
а – двухфазная; б – трехфазная.

Каждая линия должна иметь по всей длине одинаковое число проводников одного и того же сечения. Расстояния между точками присоединения светильников к групповой линии должны быть одинаковыми в пределах проектируемого производственного помещения, что необходимо для создания равномерной освещенности по площади цеха. Основанием для применения трехфазных групп (реже двухфазных) является большая допустимая нагрузка и длина линий по сравнению с однофазными, существенное сокращение суммарной длины проводов и кабелей, а также уменьшение расхода цветного металла при сооружении осветительной сети (пять проводников трехфазной линии заменяют девять проводников того же сечения трех однофазных линий). Трехфазные линии обязательны, когда для снижения пульсаций светового потока и проявлений

стробоскопического эффекта требуется применять чередование фаз при подключении светильников с газоразрядными лампами.

При распределении светильников по группам необходимо учитывать расположение помещений относительно осветительных щитков, поскольку с места установки ЩО должны быть видны отключаемые ряды светильников. Для освещения проходов и лестничных клеток желательно предусматривать отдельные групповые линии.

При подключении светильников к групповой линии следует обеспечивать по возможности равномерную загрузку фаз. Разница в нагрузке фаз отдельных групповых линий не должна превышать 30 %, а в начале питающих линий – 10 %.

Выбор осветительных установок производится с учетом всех условий электроснабжения проектируемого объекта. При этом для обеспечения требуемого качества освещения большое значение имеет выбор источника питания (ИП). Электрические сети для питания освещения и силового электрооборудования рекомендуется выполнять, как правило, отдельными. Совмещение питающих сетей силовых и осветительных установок целесообразно в крупных производственных и общественных зданиях при использовании в качестве питающих линий магистральных шинопроводов, а также для зданий, электроснабжение которых осуществляется от отдельно стоящих подстанций [19].

На большинстве промышленных предприятий электроснабжение осветительных установок осуществляется от общих для силовых и осветительных нагрузок трансформаторов с вторичным напряжением 0,4/0,23 кВ. Недостатком такого технического решения является то, что при одно- и двухсменном режиме работы из-за незначительной осветительной нагрузки в ночное время приходится оставлять включенными достаточно мощные цеховые трансформаторы. Это приводит не только к нерациональному расходу электроэнергии, обусловленному увеличением доли потерь в общем электропотреблении, но и к ускоренному перегоранию ламп вследствие повышения вторичного напряжения при снижении нагрузки трансформатора. Отметим также, что повышение напряжения, подводимого к электрическим лампам, вызывает увеличение затрат электроэнергии на искусственное освещение. Наличие перемычек между распределительными устройствами напряжением до 1 кВ соседних ТП по-

зволяет избавиться от указанного недостатка, так как в этом случае имеется возможность отключать часть трансформаторов в период спада электрической нагрузки потребителя электроэнергии. Не рекомендуется подключать сеть электрического освещения к трансформаторам, к которым присоединены электроприемники, способные ухудшать показатели качества напряжения. В обоснованных случаях осветительные установки могут получать электроэнергию от отдельных трансформаторов. Самостоятельные осветительные трансформаторы могут оказаться необходимыми и экономически оправданными при несовпадении номинальных напряжений силовых и осветительных сетей, при высокой плотности осветительной нагрузки, а также при резко переменном, ударном характере силовой нагрузки. Совмещенные трансформаторы, используемые для питания осветительных установок, должны иметь относительно спокойную силовую нагрузку.

Если в здании имеется несколько ТП, то для освещения может быть выделена их часть с учетом характера силовой нагрузки и целесообразного радиуса действия каждой подстанции. При этом необходимо принимать во внимание, что с увеличением числа используемых для электрического освещения ТП облегчается режим работы питающей сети, однако возрастает стоимость распределительных устройств и усложняется управление освещением. Приближенным критерием для оценки целесообразности использования для питания освещения того или иного количества ТП может служить близость сечений жил питающих линий, определяемых по допустимому нагреву и допустимой потере напряжения [7].

На промышленных предприятиях могут применяться ТП, работающие в блоке с определенным технологическим оборудованием, отключаемые при остановке его на профилактическое обслуживание и ремонт, когда искусственное освещение требуется так же, как и в процессе производства. Следовательно, необходимо избегать питания осветительных установок от таких ТП или же предусматривать перемычки между щитами вторичного напряжения соседних ТП, позволяющие осуществлять взаимное резервирование электроснабжения.

При выборе схем электрических сетей необходимо обеспечивать требуемую бесперебойность работы осветительных установок с учетом категории электроприемников по надежности электроснаб-

жения, предусматривая независимый источник питания для светильников аварийного освещения или их автоматическое включение при внезапном исчезновении напряжения в сети рабочего освещения.

Рабочее освещение питается, как правило, самостоятельными линиями от шин РУ до 1 кВ ТП или от головных участков магистральных шинопроводов. Питающая осветительная сеть в большинстве случаев выполняется двухступенчатой. К первой ступени относятся линии, связывающие ТП с промежуточными распределительными щитками освещения (РЩО), а ко второй – линии от РЩО до групповых щитков. Иногда РЩО называют также магистральными щитками. Их применение объясняется ограниченностью числа автоматических выключателей в распределительных щитах ТП и их большими номинальными токами. В небольших цехах РЩО могут не устанавливаться, а питающая одноступенчатая сеть присоединяется непосредственно к групповым щиткам.

1.5. Актуальность вопросов повышения эффективности и надежности осветительных установок

Любая сфера деятельности человека требует организации системы освещения. Безусловно, наиболее благоприятным для организма человека является естественное освещение, однако жизнедеятельность его сегодня настолько разнообразна, что захватывает и темное время суток, что вызывает необходимость создания современной, эффективной, надежной, качественной системы искусственного освещения.

Под энергоэффективностью понимается комплекс решений, которые характеризуют зависимость затраченных средств (энергоресурсов) к полученному полезному эффекту. Использование меньшего количества энергии при получении того же уровня энергетического обеспечения – задача энергоэффективных решений. Понятие энергоэффективность тесно связано с понятием энергосбережение. Энергосбережение – экономия электроэнергии, которая достигается путем применения различных мер (правовые, научные, технические, экономические), направленных на рационализацию использования энергоресурсов.

На сегодняшний день стоимость создания киловатта генерирующих мощностей на электростанциях разного типа стоит примерно 1-3 тыс. долл. США. В то же время снижение установленной мощности на киловатт освещения стоит 150-200 долл. США. Это существенная разница и, кроме того, уменьшение электропотребления связано с решением важнейшей проблемы снижения вредных выбросов в атмосферу.

Можно выделить некоторые мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности систем освещения, такие, как максимальное использование дневного света (увеличение площади остекления с использованием современных теплоудерживающих материалов), высокая отражающая способность стен и потолков, увеличение коэффициента светоотдачи от источников света, замена традиционных ламп на энергосберегающие лампы (люминесцентные и светодиодные), устройства автоматизации для управления светом (датчики движения, освещения, таймеры), установка распределительных систем для управления светом.

Во всем мире, в том числе в странах, которые входят в Международное энергетическое агентство (МЭА), к основным энергосберегающим действиям в области освещения относят использование компактных люминесцентных ламп, установку ЭПРА, применение люминесцентных трубчатых ламп типа Т5.

Качество системы искусственного освещения обеспечивается не только ее экономичностью, но световым комфортом, который она обеспечивает. Создание светового комфорта подразумевает поддержание требуемых уровней освещенности, равномерности освещения, снижение блескости источника света, выбора источников света с подходящими цветовыми характеристиками и т.п. Кроме того, следует иметь в виду, что световые приборы часто участвуют в формировании дизайна помещения.

Еще одной проблемой создания энергоэффективного освещения является порой недостаточная грамотность в этой области как населения, так и самих специалистов. Существующее сегодня на рынке разнообразие световых приборов, обладающих множеством характеристик и особенностей применения, большое количество производителей светотехнической продукции, имеющей разные качественные характеристики, многофакторные требования к освещению

различных объектов требуют глубоких знаний и специальной подготовки в области светотехники.

Повышение эффективности использования электроэнергии на освещение сводится к решению следующих основных задач:

- повышение качества проектирования систем электрического освещения на основе современных нормативно-технических документов с учетом достижений научно-технического прогресса в электрическом освещении;
- совершенствование световых приборов и повышение качества изготовления светотехнических изделий;
- повышение экономичности систем электрического освещения путем использования энергетически эффективных световых приборов;
- совершенствование способов искусственного освещения с учетом максимального использования естественного света;
- повышение уровня эксплуатации осветительных установок;
- совершенствование способов и средств управления осветительными установками;
- обеспечение требуемого качества напряжения, подводимого к клеммам световых приборов;
- стимулирование потребителей электроэнергии за применение энергосберегающих источников света;
- повышение уровня энергетической культуры населения.

При проектировании энергетически эффективной осветительной установки необходимо руководствоваться следующими принципами:

- осуществление постоянного контроля светового потока источников света;
- использование световых приборов с эффективным распределением светового потока;
- применение системы, адаптивной к изменению требований к освещению;
- учет требований по ограничению прямой ослепленности;
- применение ламп с высокой световой отдачей и улучшенной цветопередачей;
- использование световых приборов с повышенным КПД и облегченными условиями по установке и содержанию;

- применение электронных или электромагнитных балластных устройств с уменьшенными потерями;

- окрашивание поверхности помещения в светлые тона.

Совершенствование средств электрического освещения в процессе их разработки и создания должно осуществляться в направлении повышения КПД и эффективности светораспределения, а также стабилизации светового потока и характеристик световых приборов в ходе эксплуатации. Для этого с учетом современных тенденций и инноваций в светотехнике, предъявляемых требований к качеству и энергоэффективности осветительных установок, должны создаваться новые, высокоэффективные световые приборы для различных отраслей промышленности. На промышленных предприятиях большинство помещений имеют тяжелые условия окружающей среды (жаркие, сырые, пыльные, пожароопасные и т.д.). При этом помещения, в которых осуществляются разнообразные технологические процессы, могут отличаться по высоте и строительным модулям. Следовательно, для освещения требуются световые приборы с разными источниками света, разного исполнения и светораспределения, должного технического уровня и дизайна.

Технологические процессы, осуществляемые на большинстве промышленных предприятий, а также особенности работы торговых, зрелищных и других коммунально-бытовых объектов, как правило, не допускают перерывов в работе световых приборов в основных помещениях. Это накладывает определенные требования к схемам электроснабжения устройств электрического освещения и качеству напряжения, подводимого к электрическим лампам. Надежность схем электроснабжения световых приборов и долговечность используемого оборудования является одним из основных требований при создании осветительных установок.

Питание световых приборов системы аварийного освещения должно быть бесперебойным, что в современных условиях обеспечивается установкой резервных генераторов или применением световых приборов с автономным источником питания (например, с аккумуляторной батареей). Для различных помещений существует множество схем электроснабжения световых приборов, на выбор которых оказывает влияние множество факторов, основными из которых являются технические характеристики располагаемых источников питания, схемы распределительных устройств напряже-

нием до 1 кВ трансформаторных подстанций, применяемые на освещаемом объекте системы освещения, используемые устройства управления осветительными приборами и т.д. На конструктивное исполнение электрических сетей первостепенное влияние оказывают условия окружающей среды, требования электробезопасности, технической эстетики и т.д.

Проектирование и эксплуатация осветительных установок с традиционными источниками света (газоразрядными лампами, лампами накаливания) осуществляются на базе существующей нормативно-технической документации с использованием типовых схемных и конструктивных решений. В то же время недостаточно учитывается влияние применяемых источников света и световых приборов на работу электрических сетей систем электрического освещения. В частности, не всегда учитывается влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока на электрические сети и электрооборудование осветительных установок. Слабо изучены статические характеристики по напряжению световых приборов с газоразрядными источниками света высокого давления (ламп типа ДРИ, ДНаТ и др.), оснащенных электромагнитными и электронными ПРА. Особенно это касается зависимостей от напряжения потребляемой реактивной и полной мощности комплектов «ПРА-газоразрядная лампа».

Одним из условий рационального расходования электроэнергии является поддержание уровней напряжения в осветительной сети в допустимых пределах: от 95 до 105 % номинального напряжения $U_{ном}$. В процессе эксплуатации систем электрического освещения по ряду причин уровни напряжения в электрических сетях в течение суток может существенно изменяться. В ночное время, когда снижается силовая нагрузка, напряжение может существенно повышаться, что приводит к увеличению расхода электроэнергии на освещение и даже к перегоранию ламп. Изменение величины напряжения в ряде случаев может носить сезонный характер. В летний период отключается отопительная вентиляция, тепловые завесы, котельные, сокращается мощность, потребляемая световыми приборами. Это снижает электрическую нагрузку и, следовательно, потери напряжения в электрических сетях, что увеличивает напряжение, подводимое к источникам света, если не применять специальные меры по регулированию напряжения.

Появлению на рынке электротехнических изделий светодиодных источников светового излучения не предшествовали серьезные исследования, подтверждающие пригодность этих источников света принципиально нового типа к широкому применению в системах электрического освещения. Практически отсутствует нормативно-техническая литература и методики расчета электрического освещения с применением светодиодных источников света. Не разработаны типовые, наиболее рациональные схемы питания светильников на основе светодиодов.

В результате при создании и эксплуатации осветительных установок с применением светодиодов используются те же подходы, что и для газоразрядных ламп, что не может считаться правильным.

Надежность систем электрического освещения в значительной мере зависит от функционирования источников света. В течение определенного времени (срока службы) источник света должен нормально функционировать. Как правило, под сроком службы понимают время, в течение которого устройство работает до момента выхода из строя. Для световых приборов момент выхода из строя не обязательно определяется как полная неработоспособность. Это может быть ухудшение некоторых технических характеристик ниже определенного уровня. Например, при оценке срока службы светодиодов момент выхода их из строя определяется как снижение светового потока ниже определенного процента от номинального значения. При этом некоторые производители считают таким порогом снижение светового потока на 30% от номинального значения, другие – на 50%. На срок службы светодиода оказывают влияние следующие факторы:

- деградация кристалла;
- старение люминофора;
- механические деформации, внутренние напряжения в корпусе и т.п.;
- помутнение первичной оптики.

Срок службы светового прибора определяется не только качеством используемых светодиодов, но и параметрами других узлов конструкции. Применение современных материалов и электронных компонентов, а также эффективные драйвер и система охлаждения позволяют довести срок службы светильника до значения срока службы самих светодиодов. Для этого требуются значительные ин-

вестиции в исследования и производство световых приборов на основе светодиодов.

На промышленных предприятиях и в общественных зданиях в настоящее время главным образом используются системы электрического освещения с газоразрядными лампами высокого и низкого давления. В связи с этим исследования, направленные на повышение эффективности осветительных установок с такими источниками света, не теряют своей актуальности.

2. НАГРЕВАНИЕ И ТЕПЛОВЫЙ ИЗНОС ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДНИКОВ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ

2.1. Анализ тепловых режимов проводов и кабелей электрических осветительных сетей

Основной причиной отказов в осветительных сетях является тепловой износ изоляции проводов и кабелей, обусловленный электрическим током. Ток, протекающий в проводниках, вызывает их нагрев. Количество теплоты, выделяемой в проводнике за некоторое время t , определяется уравнением

$$Q = I^2 R t,$$

где I – ток, протекающий по проводнику, А;

R – активное сопротивление проводника при температуре жилы $\Theta_{ж}$.

Часть электроэнергии, передаваемой по проводнику, превращается в теплоту, которая вначале расходуется на его нагревание до определенной температуры, а затем на поддержание установившегося теплового режима. В этом режиме при неизменном токе нагрузки, что характерно для сетей электрического освещения, и постоянной температуре окружающей среды, количество теплоты, выделяющейся в проводнике за определенное время, становится равным количеству теплоты, отдаваемой в окружающую среду. Температура жилы проводника $\Theta_{ж}$, при которой наступает тепловое равновесие, называется установившейся [20].

Проводники работающей осветительной установки находятся не в одинаковых температурных режимах. На провода и кабели групповых, распределительных и питающих линий сети электрического освещения воздействует температура окружающей среды, на которую незначительное влияние оказывает нагревание включенных световых приборов. При правильном выборе по допустимому нагреву сечений жил проводов и кабелей электрические осветительные сети не испытывают серьезных осложнений от температурных воздействий и обеспечивают надежную работу осветительных установок. Иное дело проводники ответвлений к световым приборам и

смонтированные непосредственно в самих светильниках, которые подвергаются дополнительному тепловому нагреву от источников света и ПРА. Внутренняя электропроводка в светильниках работает, зачастую, в напряженном тепловом режиме, особенно вблизи патронов. Это может привести к ускоренному тепловому износу и разрушению изоляции проводников, и, в конечном счете, к отказам в работе световых приборов и внезапным отключениям групповых линий. Поэтому для повышения надежности систем электрического освещения в светильниках рекомендуется применять проводники с термостойкой изоляцией.

Перегрев, превышающий допустимый, вызывает ускоренный тепловой износ изоляции, ухудшает контактные соединения (проводников, электрических аппаратов, патронов, выключателей и т.д.) из-за их интенсивного окисления и создает угрозу пожаров в зданиях, а во взрывоопасных помещениях – взрывов.

В тепловых расчетах удобнее использовать не абсолютную температуру нагрева проводника, а температуру перегрева, которая определяется по выражению

$$\tau = \Theta_{жс} - \Theta_c,$$

где Θ_c - действительная температура окружающей среды.

Процесс теплового перегрева проводника током нагрузки описывается следующей формулой [20]

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (2.1)$$

где τ_y - установившееся значение перегрева при заданном токе нагрузки, °С;

t – текущее время, мин;

T – постоянная времени нагрева проводника, мин.

Охлаждение проводника после отключения электрической цепи, в которой он используется, описывается уравнением

$$\tau = \tau_y e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2.2)$$

На рисунке 2.1 для иллюстрации показаны кривые нагрева и охлаждения проводника.

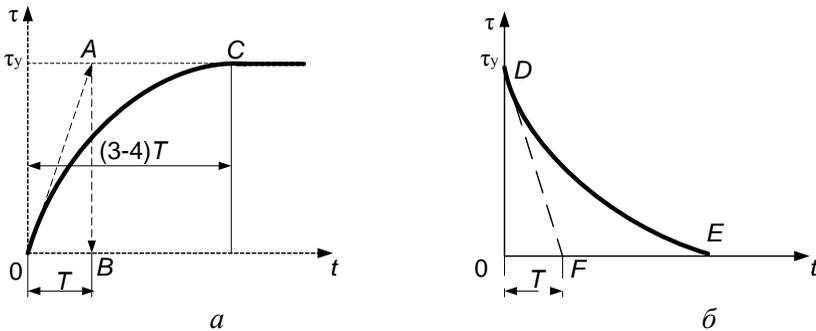


Рис. 2.1 Кривые нагрева (а) и охлаждения (б) проводника

Постоянная времени нагрева представляет собой время, в течение которого температура перегрева проводника достигла бы установившегося значения τ_y , если бы не было отдачи теплоты в окружающую среду. Численно T определяется как отношение теплоемкости проводника к его тепловой отдаче [20]. Нагрев провода или кабеля протекает тем медленнее, чем больше постоянная времени T , и наоборот. Следовательно, при небольшой величине T проводник быстро достигнет установившейся температуры нагрева.

Для нахождения постоянной нагрева проводника по графику следует провести касательную OA к кривой нагрева в точке O до пересечения ее с линией установившегося перегрева (рис. 2.1 - а). Затем опустить перпендикуляр AB на ось абсцисс. Полученный отрезок OB в определенном масштабе представляет собой постоянную времени нагрева проводника T .

Приняв $t = T$, по формуле (2.1) можно определить, что за время, равное T , температура перегрева проводника τ достигает значения $0,632 \tau_y$. Расчет по выражению (2.2) показывает, что при охлаждении за это же время температура перегрева уменьшается до величины $0,368 \tau_y$.

Средние значения постоянной времени нагрева проводов с рези-

новой и поливинилхлоридной изоляцией приведены в таблице 2.1 [21].

Таблица 2.1

Значения постоянной времени нагрева одножильных проводов с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией

| Сечение жилы, мм ² | Постоянная времени нагрева проводов, мин | | | | | | | |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|------|------|-------------------------------------|-----------------------------------|------|------|
| | с медными жилами при прокладке | | | | с алюминиевыми жилами при прокладке | | | |
| | открыто на опорах (изоляторах) | в одной трубе при количестве, шт. | | | открыто на опорах (изоляторах) | в одной трубе при количестве, шт. | | |
| | | 2 | 3 | 4 | | 2 | 3 | 4 |
| 4 | 2,4 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 2,0 | 2,1 | 2,5 | 3,4 |
| 6 | 3,0 | 4,0 | 4,75 | 6,25 | 2,5 | 3,4 | 4,0 | 5,3 |
| 10 | 4,2 | 6,75 | 7,5 | 9,5 | 3,5 | 5,7 | 6,3 | 8,0 |
| 16 | 5,6 | 9,3 | 11,0 | 13,7 | 4,7 | 7,9 | 9,3 | 11,6 |
| 25 | 7,2 | 13,0 | 15,7 | 19,5 | 6,1 | 11,0 | 13,3 | 16,5 |
| 35 | 9,0 | 15,7 | 19,5 | 24,0 | 7,6 | 13,3 | 16,5 | 20,4 |
| 50 | 12,0 | 19,0 | 23,5 | 28,3 | 10,2 | 16,1 | 19,9 | 24,0 |
| 70 | 15,0 | 22,0 | 27,5 | 33,0 | 12,7 | 18,7 | 23,3 | 28,0 |
| 95 | 18,4 | 26,3 | 32,0 | 37,5 | 15,6 | 22,3 | 27,2 | 31,8 |
| 120 | 21,4 | 29,5 | 35,8 | 42,0 | 25,1 | 25,0 | 30,4 | 35,7 |
| 150 | 24,4 | 33,5 | 41,0 | 47,0 | 20,7 | 28,4 | 34,8 | 39,9 |

Постоянная времени нагрева токоведущих элементов электрических сетей зависит от материала проводника, его сечения и способа прокладки и может изменяться от нескольких минут до нескольких часов. Например, при прокладке в одной трубе четырех изолированных проводов из алюминия с резиновой изоляцией сечением 4 мм² $T = 3,4$ минуты, а таких же проводов сечением 50 мм² - $T = 24,0$ минуты. На установившийся режим нагрева, после которого дальнейшее повышение температуры прекратится, проводник выходит за время $t = (3-4)T$. Таким образом, применяемые в групповых линиях проводники сечением до 4 мм², достигают установившейся температуры перегрева за время, не превышающее 10 – 14 минут.

Пусковые токи, возникающие при включении электрического освещения, имеют небольшую длительность. Даже у газоразрядных

ламп высокого давления типа ДРЛ с затяжным пуском стабилизация рабочего тока происходит примерно за 4 минуты. Следовательно, за время пуска световых приборов с любыми источниками света проводники сетей электрического освещения не достигают установившегося перегрева. Принимая во внимание, что в осветительных установках производственных объектов в течение суток операции включения производятся относительно редко, можно сделать вывод о том, что пусковые токи не оказывают существенного влияния на тепловые процессы в электрических сетях.

Групповые линии, питающие светильники одного помещения, после включения имеют практически неизменную во времени нагрузку. В этом случае при включении нагрузки и после ее отключения в момент времени t_0 перегрев проводника может быть представлен в виде кривой, показанной на рисунке 2.2. Участки кривой $O-A-B$ и $B-C$ описываются уравнениями (2.1) и (2.2) соответственно.

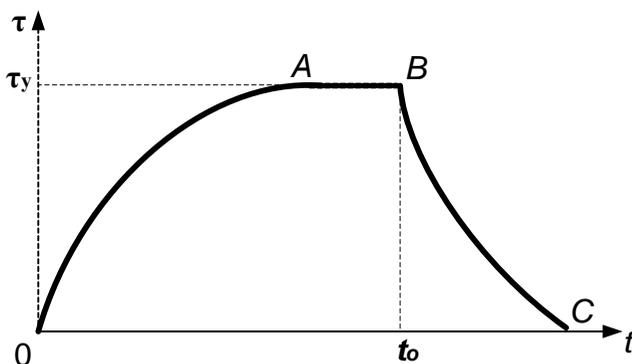


Рис. 2.2 Изменение температуры перегрева проводника при постоянной нагрузке и после ее отключения

Питающие и распределительные линии, а также групповые линии осветительных установок, обеспечивающие работу световых приборов нескольких помещений, могут иметь ступенчатый график нагрузки, конфигурация которого зависит от числа включенных световых приборов. При изменяющейся во времени нагрузке в тех

случаях, когда необходимо определить температуру перегрева проводника, начинающегося с некоторого значения перегрева τ_0 , процесс нагрева можно рассматривать как сумму двух процессов (рис. 2.3):

1) перегрева от значения $\tau = 0$ до $\tau = \tau_y$ (кривая 1 на рисунке 2.3);

2) охлаждения от значения $\tau = \tau_0$ до $\tau = 0$ (кривая 2 на рисунке 2.3).

Рассматриваемый процесс перегрева проводников описывается следующим уравнением [20]:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2.3)$$

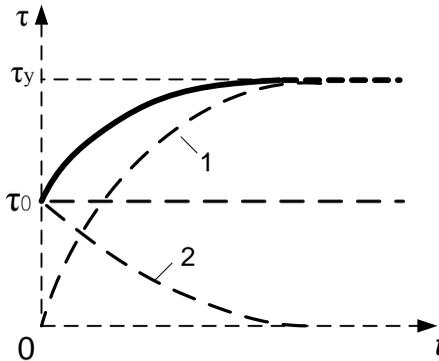


Рис. 2.3 Перегрев проводника при изменяющейся нагрузке

При наличии многоступенчатого графика нагрузки температура перегрева определяется по выражению (2.3) для каждого интервала времени, в течение которого нагрузка не изменяется или усредняется.

2.2. Допустимые длительные токи проводников осветительных установок

Допустимым длительным током по нагреву называется длительно протекающий ток, при котором устанавливается длительная допустимая температура проводника. Величина его зависит от материала и площади поперечного сечения проводника, вида изоляции и окружающей среды (воздух, земля или вода), в которой прокладываются кабели и провода.

В процессе эксплуатации проводники при продолжительной нагрузке не должны перегреваться сверх длительно допустимой температуры $\Theta_{\text{длн}}$, величина которой установлена [25]:

90°C – для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена;

80°C – для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией напряжением до 3 кВ;

70°C – для шин и неизолированных проводов;

65°C – для кабелей и проводов с резиновой или пластмассовой изоляцией напряжением до 1 кВ.

В изолированном проводнике выделяемый тепловой поток должен преодолевать тепловое сопротивление слоя изоляции. Под тепловым (термическим) сопротивлением понимается способность тела (его поверхности или какого-либо слоя) препятствовать распространению теплового движения [молекул](#). Различают полное тепловое сопротивление — величину, обратную [коэффициенту теплопередачи](#), поверхностное тепловое сопротивление — величину, обратную коэффициенту теплоотдачи, и тепловое сопротивление слоя, равное отношению толщины слоя к его [коэффициенту теплопроводности](#).

Тепловое сопротивление на участке тепловой цепи, выраженное в К/Вт, определяется по выражению

$$S = \frac{\Theta - \Theta_1}{P},$$

где Θ - температура в начале участка, К;

Θ_1 -температура в конце участка, К;

P - тепловой поток, протекающий через участок цепи, Вт.

Удельное тепловое сопротивление, выражаемое в К·см/Вт, численно равно падению температуры на противоположных сторонах 1 см³ образца вещества при тепловом потоке 1 Вт.

Допустимая температура нагрева изолированных проводов определяется тепловым износом и сохранностью изоляции. Ее длительный срок службы может быть обеспечен лишь при условии, что в процессе эксплуатации температура токопроводящей жилы не превышает допустимого значения.

Изолированные провода имеют меньшую допустимую температуру нагрева и слой изоляции с определенным тепловым сопротивлением. Однако при одном и том же проводниковом материале и сечении их допустимые токи примерно такие же, как у неизолированных проводов. Это обусловлено тем, что изолированные провода имеют большую поверхность охлаждения, изоляционные материалы обладают относительно небольшим тепловым сопротивлением, поверхность провода шероховатая и более темного цвета, что увеличивает отдачу теплоты в окружающую среду конвекцией и лучеиспусканием [22].

В сравнении с изолированными проводами кабели сложнее в конструктивном исполнении. Это предопределяет более сложные тепловые процессы, протекающие в кабеле. Величина длительного допустимого тока кабеля зависит от среды, которая окружает кабель, воздействия теплового излучения от внешнего источника теплоты и т.д. Охлаждение кабеля, проложенного в воздухе, зависит от скорости и направления движения воздуха, наличия в нем влаги и т.п. При совместной прокладке нескольких кабелей учитывается их возможное взаимное влияние, вызывающее ухудшение условий отдачи в окружающую среду теплоты, выделяемой в кабелях.

В общем случае допустимый по нагреву длительный ток кабеля зависит от ряда факторов [23]:

$$I_{доп} = f(n, \Theta_{жн}, \Theta_{сн}, S_{кв}, R, P_u),$$

где n -число токопроводящих жил в кабеле;

$\Theta_{жн}$ - допустимая нормированная температура нагрева жилы кабеля при продолжительной нагрузке, °C;

$\Theta_{сн}$ - условная нормированная температура окружающей среды, °C;

$S_{кc}$ - суммарное тепловое сопротивление кабеля и окружающей среды, К·см/Вт;

R - активное электрическое сопротивление одного сантиметра токопроводящей жилы при 20°C, Ом;

$P_{и}$ - мощность, рассеиваемая в изоляции кабеля за счет диэлектрических потерь, Вт.

Уменьшение η , R , $\Theta_{сн}$, $S_{кc}$ и $P_{и}$, а также увеличение $\Theta_{жн}$ способствует повышению $I_{доп}$. При одинаковом числе жил из одного и того же проводникового материала величина $I_{доп}$ главным образом зависит от значений $\Theta_{жн}$ и $S_{кc}$. Следовательно, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, у которых $\Theta_{жн} = 90^\circ\text{C}$, при идентичных условиях прокладки допускают большие токи нагрузки по сравнению с кабелями с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией, имеющих на напряжении до 1 кВ $\Theta_{жн} = 65^\circ\text{C}$.

При прокладке в воздухе величина $S_{кc}$ складывается из тепловых сопротивлений кабеля и его поверхности, а при прокладке в земле – из тепловых сопротивлений кабеля, защитных покровов и почвы, окружающей кабель [24]. Тепловое сопротивление кабеля зависит в основном от геометрических размеров и конструктивных особенностей, а также от удельных тепловых сопротивлений материалов, из которых изготовлен кабель.

Длительно допустимые по нагреву токи для проводов и кабелей могут определяться на основе тепловых расчетов. Однако формулы для расчета допустимых нагрузок для изолированных проводов получаются сложными и содержат ряд величин, не поддающихся строгому математическому описанию. Поэтому при установлении значений допустимых по нагреву токов изолированных проводов широко используются экспериментальные данные.

Значения $I_{\text{доп}}$ для основных способов прокладки проводов с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией, шнуров с резиновой изоляцией и кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией в разных оболочках приведены в таблицах [25]. При этом значения $I_{\text{доп}}$ даются для кабелей, проложенных в воздухе, земле и воде, а для проводов, проложенных открыто и в одной трубе.

2.3. Выбор сечений жил проводников по допустимому нагреву

Выбор площади поперечного сечения проводников при проектировании электрооборудования зданий оказывает существенное влияние на эффективность функционирования осветительных установок. От величины принятого сечения жил проводов и кабелей зависят затраты на сооружение и эксплуатацию осветительных установок, потери мощности и электроэнергии в электрических сетях, а также уровни напряжения на зажимах световых приборов.

Если сечение проводников осветительной сети занижить, то это несколько снизит ее стоимость, но приведет к ускоренному тепловому износу изоляции, увеличению потерь мощности, электроэнергии и напряжения. Увеличение потерь напряжения может вызвать ухудшение качества освещения. Завышение сечения проводников влечет за собой увеличение капитальных затрат на электрическую сеть.

Проводники электрических сетей по нагреву выбираются по таблицам допустимых длительных токов исходя из расчетного тока I_p линии по условию

$$I_{\text{доп}} \geq I_p / K_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

где $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия прокладки проводов и кабелей.

В подавляющем числе случаев при расчете электрических осветительных сетей поправочный коэффициент определяется по выражению

$$K_{\text{п}} = K_1 K_2,$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты, учитывающие фактическую температуру окружающей среды и количество совместно проложенных проводников.

Поправочный коэффициент на допустимый ток, учитывающий фактическую температуру окружающей среды, можно определить по справочной таблице [25] или рассчитать по следующей формуле [19]:

$$K_1 = \sqrt{\frac{\Theta_{жн} - \Theta_c}{\Theta_{жн} - \Theta_{сн}}}, \quad (2.5)$$

где Θ_c – расчетная температура окружающей среды.

Значения коэффициента K_2 зависят от способа прокладки проводов и кабелей и принимаются в соответствии с [25].

При определении числа жил кабелей и проводов, прокладываемых в одной трубе, принимается в расчет нулевой рабочий проводник (N , PEN) трехфазной линии, если по нему протекает ток, значение которого сопоставимо с током фазных проводников (например, при питании по линии газоразрядных ламп с некомпенсированными ПРА ток в нулевом проводнике может превышать токи в фазных проводниках).

Допустимые токовые нагрузки проводников, способы прокладки которых отличаются от указанных в справочных таблицах, принимаются следующими [20]:

- для тросовых проводов – как для кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией;
- для проводов, проложенных в пластмассовых трубах или электротехнических плинтусах, – как для проводов в стальных трубах с понижением допустимых нагрузок на 10–15 %;
- для проводов, проложенных в каналах строительных конструкций, а также замоноличенных проводок – как для проводов в трубах;
- для пятипроводных линий, проложенных в трубах или каналах строительных конструкций, питающих светильники с лампами накаливания (или силовые электроприемники), – как для трех одножильных проводов, прокладываемых в одной трубе, а для таких же

линий, питающих газоразрядные лампы, – как для четырех одножильных проводов, прокладываемых в одной трубе;

- для пятижильных кабелей, питающих лампы накаливания, – как для трехжильных кабелей, а при питании газоразрядных ламп – как для четырехжильных кабелей;

- для проводов, проложенных в коробах, а также в лотках пучками, – как для проводов, проложенных в трубах;

- для кабелей, проложенных в коробах или лотках, – как для кабелей, проложенных в воздухе;

- для проводов, проложенных в лотках в один ряд, – как для открыто проложенных проводов;

- при количестве одновременно нагруженных проводов более трех, проложенных в трубах, коробах, а также в лотках пучками, – как для проводов, проложенных открыто с введением снижающих коэффициентов 0,68 для 5 и 6; 0,63 для 7–9 и 0,6 для 10–12 проводов.

Расчетный ток для сетей электрического освещения вычисляется по формулам:

-для трехфазной сети (четырёх- и пятипроводной)

$$I_p = \frac{K_c K_{ПРА} P_{ном} 10^3}{3 \cdot U_{ном \phi} \cdot \cos \varphi} ;$$

-для двухфазной сети с рабочим и защитным нулевым проводом (трех- и четырехпроводной)

$$I_p = \frac{K_c K_{ПРА} P_{ном} 10^3}{2 \cdot U_{ном \phi} \cdot \cos \varphi} ;$$

-для однофазной сети (двух- и трехпроводной)

$$I_p = \frac{K_c K_{ПРА} P_{ном} 10^3}{U_{ном \phi} \cdot \cos \varphi} ,$$

где K_c – коэффициент спроса для осветительных электроприемников;

$K_{\text{ПРА}}$ – коэффициент, учитывающий потери в ПРА газоразрядных ламп;

$P_{\text{ном}}$ – суммарная номинальная мощность электрических ламп, питающихся по линии, кВт;

$U_{\text{ном ф}}$ – номинальное фазное напряжение сети, $U_{\text{ном ф}} = 230$ В;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности активной нагрузки.

При отсутствии данных обследования осветительных установок коэффициент спроса для расчета питающей сети рабочего освещения производственных зданий следует принимать равным [15]:

1,0 – для мелких зданий и линий, питающих отдельные групповые щитки;

0,95 – для зданий, состоящих из отдельных крупных пролетов;

0,9 – для библиотек и административных зданий;

0,85 – для зданий, состоящих из многих отдельных помещений;

0,8 – для лечебных, конторско-бытовых и лабораторных зданий;

0,6 – для складских зданий, состоящих из многих отдельных помещений, а также для электрических подстанций.

Для расчета групповой сети рабочего освещения и всех звеньев сети аварийного освещения производственных объектов, а также наружного освещения коэффициент спроса принимается равным единице.

Значение $K_{\text{ПРА}}$ принимается равным [7]:

1,0 – для ламп накаливания;

1,1 – для ламп типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ;

1,2 – для люминесцентных ламп (ЛЛ) со стартерной схемой пуска;

1,3 – для ЛЛ при бесстартерной схеме пуска.

В электронных ПРА потери мощности примерно на 20–50 % меньше по сравнению с электромагнитными.

Светильники на две и более ЛЛ комплектуются ПРА, обеспечивающими $\cos \varphi$ не менее 0,92, а на одну ЛЛ – 0,9 [7]. Большинство светильников с газоразрядными лампами высокого давления (типа ДРЛ, ДРИ и т. п.) при напряжении 230 В имеют некомпенсированные ПРА со средним значением $\cos \varphi = 0,5$. Для светильников с

лампами накаливания $\cos \varphi = 1$. Соответствующие коэффициенты мощности будут иметь нагрузки осветительных линий.

В случае неравномерной нагрузки фаз расчетная активная нагрузка линии принимается равной утроенному значению нагрузки наиболее загруженной фазы.

2.4. Приближенная оценка температуры нагрева жил проводов и кабелей

От температуры проводника зависит его активное сопротивление, которое используется в электрических расчетах. Для проводов и кабелей с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией, применяемых в электрических сетях осветительных установок, принята наибольшая длительно допустимая температура нагрева жил $\Theta_{жн} = 65^\circ\text{C}$, а нормированная условная температура окружающей среды при прокладке в воздухе - $\Theta_{сн} = 25^\circ\text{C}$ [25]. В этом случае нормированное превышение температуры жилы по отношению к температуре окружающей среды (температуре перегрева) определяется по формуле

$$\tau_n = \Theta_{жн} - \Theta_{он}$$

При наличии информации о допустимых токовых нагрузках и установившейся температуре перегрева проводников с достаточной для практических целей точностью можно приблизительно оценивать температуру перегрева проводников при нагрузках, отличающихся от допустимых значений. Так, например, для тока I , отличающегося от длительно допустимого по нагреву $I_{дон}$, фактическое превышение температуры жилы кабеля или провода вычисляется по формуле [20]

$$\tau = \tau_n \cdot (I / I_{дон})^2. \quad (2.6)$$

Формуле (2.6) не учитывает изменение активного сопротивления проводника в зависимости от его температуры. Однако при реально возможных нагревах проводников это не имеет существенного зна-

чения и пересчет температуры перегрева по данной формуле не приводит к грубым ошибкам [4].

В выражении (2.6) отношение l к $l_{дон}$ представляет собой коэффициент нагрузки проводника

$$K_n = l / l_{дон}$$

Следовательно

$$\tau = \tau_n \cdot K_n^2 \quad (2.7)$$

Фактическая температура перегрева проводников может быть представлена как

$$\tau = \Theta_{жс} - \Theta_{сн},$$

где $\Theta_{жс}$ - фактическая температура нагрева жилы.

Тогда выражение (2.7) можно записать в следующем виде:

$$\Theta_{жс} - \Theta_{сн} = \tau_n \cdot K_n^2 \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) получим фактическую температуру жилы кабеля при нормированной условной температуре окружающей среды

$$\Theta_{жс} = \tau_n \cdot K_n^2 + \Theta_{сн} \quad (2.9)$$

В тех случаях, когда температура окружающей среды Θ_c отличается от нормированного значения ($\Theta_c \neq \Theta_{сн}$), следует вводить поправочный коэффициент K_1 , определяемый по формуле (2.5). Тогда выражение (2.9) можно записать как

$$\Theta_{жс} = \tau_n \left(\frac{K_n}{K_1} \right)^2 + \Theta_{сн} \quad (2.10)$$

Учет действительного значения температуры жил проводов и кабелей при определении их активных сопротивлений позволяет повысить точность расчетов электрических сетей освещения.

2.5. Старение изоляции проводников электрических сетей

Процесс теплового износа (старения) изоляции в относительных единицах выражается так называемым восьмиградусным правилом. Это правило заключается в следующем: каждые дополнительные 8 градусов нагрева жилы проводника сверх допустимого значения ускоряют тепловой износ изоляции (т.е. сокращают срок службы) вдвое, и наоборот. Относительный износ изоляции, отражающий отношение скорости износа изоляции при фактических длительно существующих нагрузках к скорости износа изоляции при нормированных длительно допустимой нагрузке в соответствии с [20], которая принимается за единицу, определяется по выражению

$$I = 2^{\frac{\Theta_{жс} - \Theta_{жсн}}{8}} = 2^{\frac{\tau - \tau_n}{8}} \quad (2.11)$$

При ступенчатом графике нагрузки линии по току (полной мощности) суммарное относительное тепловое старение изоляции проводников за определенный период определяется по формуле

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m I_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i} \quad (2.12)$$

где I_i - относительное тепловое старение изоляции проводника на i -й ступени графика нагрузки;

Δt_i - длительность i -й ступени графика нагрузки (интервала осреднения нагрузки), ч;

m - число ступеней графика нагрузки линии.

При одинаковых значениях длительности ступеней графика нагрузки ($\Delta t = const$) выражение (2.12) после несложного преобразования приобретает вид

$$I = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_i .$$

На каждой ступени графика нагрузки расчет теплового старения изоляции производится по формуле (2.11).

Если $I > 1$, то тепловой износ происходит быстрее в I раз относительно нормы ($I=1$) вследствие чрезмерного нагрева проводника. При $I < 1$ тепловой износ изоляции протекает замедленно. Однако это свидетельствует о неполном использовании проводника, что снижает эффективность использования электрических осветительных сетей.

Зная I , можно определить абсолютную величину старения изоляции за рассматриваемый период $T = \sum_{i=1}^m \Delta t_i$, выраженную в часах, по следующей формуле:

$$I_T = I \cdot T = I \sum_{i=1}^m t_i .$$

Для рассмотренного метода приближенной оценки теплового старения изоляции проводников целесообразно разработать алгоритм и компьютерную программу, предназначенную для использования в системах электроснабжения производственных и коммунально-бытовых объектов.

Учет фактического теплового износа изоляции проводников позволит более эффективно эксплуатировать электрические сети, своевременно планируя и осуществляя замену проводов и кабелей осветительных и силовых установок.

3. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

3.1. Показатели качества напряжения, влияющие на работу осветительных установок

Электроснабжение осветительных установок на большинстве промышленных предприятий осуществляется от общих трансформаторов с вторичным напряжением 0,23/0,4 кВ, питающих как силовые, так и осветительные электроприемники. Недостатком такого технического решения является то, что при одно- и двухсменном режиме работы в ночное время приходится оставлять включенными достаточно мощные цеховые трансформаторы для питания относительно небольшой осветительной нагрузки. Это приводит не только к нерациональному расходу электроэнергии, обусловленному увеличением доли потерь в общем электропотреблении, но и к ускоренному перегоранию ламп и повышенному тепловому износу изоляции проводов и кабелей вследствие увеличения вторичного напряжения трансформатора при снижении его нагрузки. Отметим также, что повышение напряжения, подводимого к электрическим лампам, вызывает увеличение затрат электроэнергии на искусственное освещение. Наличие перемычек между РУ напряжением до 1 кВ соседних ТП позволяет уменьшить данные негативные явления, так как в этом случае имеется возможность отключать часть трансформаторов в период спада электрической нагрузки потребителя электроэнергии. Не рекомендуется подключать сеть электрического освещения к трансформаторам, к которым присоединены электроприемники, способные ухудшать показатели качества напряжения. В обоснованных случаях осветительные установки могут получать электроэнергию от отдельных трансформаторов. Самостоятельные осветительные трансформаторы могут оказаться необходимыми и экономически оправданными при несовпадении номинальных напряжений силовых и осветительных сетей, при высокой плотности осветительной нагрузки, а также при резко переменном, ударном характере силовой нагрузки. Совмещенные трансформато-

ры, используемые для питания осветительных установок, должны иметь относительно спокойную силовую нагрузку.

В соответствии с действующим ГОСТ 13103-97 [26] установившееся отклонение напряжения (%) определяется по формуле

$$\delta U_y = (U_y - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где U_y – усредненное значение напряжения в рассматриваемой точке сети;

$U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение сети.

Отклонение напряжения обусловлено изменением потерь напряжения в элементах системы электроснабжения из-за изменения электрических нагрузок. Нормально допустимые и предельно допустимые значения δU_y на выводах приемников электрической энергии равны соответственно ± 5 и $\pm 10\%$.

Отклонение напряжения на зажимах световых приборов сверх допустимого значения может быть вызвано не только изменением режима электропотребления на промышленном предприятии, но и неправильным выбором регулировочных ответвлений силовых трансформаторов.

При отклонении фактического напряжения на выводах светового прибора от номинального значения ухудшаются его условия и показатели работы. В частности, понижение напряжения приводит к уменьшению светового потока источников света, а повышение – к сокращению их срока службы и к увеличению расхода электроэнергии на искусственное освещение.

Постепенные, плавные изменения уровня освещенности практически безвредны для органов зрения и даже способствуют тренировке адаптационного аппарата глаз человека. В то время как резкие, тем более часто повторяющиеся изменения уровня освещенности вследствие колебания напряжения в электрической сети являются, по меньшей мере, неприятными и часто признаются мешающими в работе.

Колебания напряжения характеризуются размахом изменения напряжения и дозой фликера. Размах изменения напряжения – это разность между следующими друг за другом экстремумами огибающей действующих значений напряжения любой формы. Если

огнибающая действующих значений напряжения имеет горизонтальные участки (при спокойной нагрузке), то размах изменения напряжения определяется как разность между соседними экстремумом (максимумом U_{max} или минимумом U_{min} напряжения) и горизонтальным участком или как разность между соседними горизонтальными участками [1]:

$$\delta U_i = (U_{max} - U_{min}) / U_{ном} \cdot 100 .$$

Частота повторения изменения напряжения представляет собой число одиночных изменений напряжения в единицу времени, которое при периодических колебаниях напряжения вычисляют по формуле:

$$F \delta U_i = m / T ,$$

где m – число изменений напряжения за время T ;

T – интервал времени измерения, принимаемый 10 минут.

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения δU_i в точках присоединения к электрическим сетям в зависимости от частоты повторения изменений напряжения $F \delta U_i$ или интервала между изменениями напряжения $\Delta t_{i, i+1}$, равны значениям, определяемым по графическим зависимостям, приведенным в ГОСТ 13103-97.

Колебания напряжения, характеризующиеся размахом напряжения величиной более 10%, могут вызвать погасание газоразрядных ламп. Повторно зажигаются они через несколько секунд и даже минут (в зависимости от типа лампы), что может негативно сказаться на производственном процессе промышленного предприятия.

Мигания источников света (фликер-эффект) вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма человека в целом, вследствие чего снижается острота зрения и производительность труда. Степень раздражения органов зрения в значительной степени зависит от величины и частоты миганий света. Наиболее сильное воздействие на глаза человека оказывают мигания света с частотой 3 – 10 Гц. В связи с этим допустимые колебания напряжения в указанном диапазоне минимальны. Отметим, что

степень воздействия колебаний напряжения на органы зрения зависит от типа источника света. При одинаковых колебаниях напряжения лампы накаливания оказывают значительно большее воздействие на зрение по сравнению с газоразрядными лампами.

На работу световых приборов негативно влияют возникающие в электрических сетях провалы и импульсы напряжения, а также временные перенапряжения.

Провал напряжения – это внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до начального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд [26]. Провал напряжения характеризуется показателем длительности $\Delta t_{п}$, который представляет собой интервал времени между начальным моментом провала напряжения t_n и моментом начала восстановления напряжения до начального или близкого к нему уровня t_k :

$$\Delta t_{п} = t_k - t_n.$$

Предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики.

Провалы напряжения могут привести к погасанию газоразрядных ламп и вызвать резкое уменьшение светового потока, излучаемого лампами накаливания. Все это снижает эффективность работы осветительных установок промышленных объектов, жилых и общественных зданий.

Импульс напряжения представляет собой резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд, т. е. меньше полупериода. Данный показатель характеризуется амплитудой и длительностью импульса. Амплитуда импульса – это максимальное мгновенное значение импульса напряжения. Под длительностью импульса понимается интервал времени между началь-

ным моментом импульса напряжения и моментом восстановления мгновенного напряжения первоначального или близкого к нему уровня.

Длительность импульса часто оценивается на уровне 0,5 его амплитуды. В частности, значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности на уровне 0,5 его амплитуды, равной 1000–5000 микросекунд, в электрических сетях напряжением 0,4 кВ могут достигать 4,5 кВ.

Значения грозовых импульсных напряжений с вероятностью 90 % не превышают 10 кВ в воздушной в электрической сети напряжением 0,4 кВ и 6 кВ – во внутренней электропроводке зданий и сооружений [26]. В электрической сети потребителя электроэнергии грозовые импульсные напряжения могут превышать указанные выше значения за счет отражений и преломлений грозовых импульсов в самой сети потребителя.

Внезапно появляющиеся в электрических сетях напряжением до 1 кВ кратковременные импульсы напряжения приводят к еще большим негативным последствиям, по сравнению с провалами напряжения - к перегоранию электрических ламп, выходу из строя пускорегулирующих аппаратов, систем управления и т. д. Наиболее чувствительны к импульсам напряжения электронные и микропроцессорные элементы систем управления и защиты. Для защиты от импульсов напряжения применяются ограничители

Аналогично провалам и импульсам напряжения, серьезную угрозу для осветительных установок представляют временные перенапряжения, возникающие в электрических сетях напряжением до 1 кВ вследствие коммутаций, коротких замыканий, обрыва нулевых проводников и т. д.

Временное перенапряжение представляет собой повышение напряжения в точке электрической сети выше $1,1U_{ном}$ продолжительностью более 10 миллисекунд, возникающее в системах электропитания при коммутациях или коротких замыканиях [26]. Этот показатель характеризуется коэффициентом временного перенапряжения $K_{перU}$, который представляет собой отношение максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения

$U_{a \max}$ за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети:

$$K_{nepU} = \frac{U_{a \max}}{\sqrt{2} \cdot U_{ном}}$$

Длительность временного перенапряжения Δt_{nepU} – это интервал времени между начальным моментом возникновения $t_{н \text{ пер}}$ временного перенапряжения и моментом его исчезновения $t_{к \text{ пер}}$:

$$\Delta t_{nepU} = t_{к \text{ пер}} - t_{н \text{ пер}}$$

Согласно [26], значения коэффициентов временного перенапряжения в точках подключения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений, как правило, не превышает значений, указанных в таблице 3.1. В среднем за год в точке присоединения возможны около 30 временных перенапряжений.

Таблица 3.1

Коэффициенты временного перенапряжения

| Длительность временного перенапряжения Δt_{nepU} , с | До 1 | До 20 | До 60 |
|--|------|-------|-------|
| Коэффициент временного перенапряжения, K_{nepU} , о. е. | 1,47 | 1,31 | 1,15 |

При обрыве нулевого провода PEN или N со стороны источника питания в трехфазных электрических сетях напряжением до 1 кВ, работающих с глухозаземленной нейтралью (системы заземления $TN-C$, $TN-S$ и $TN-C-S$), возникают временные перенапряжения между фазой и землей. Уровень таких перенапряжений при значительной несимметрии фазных нагрузок может достигать междуфазного напряжения, а их длительность – нескольких часов. В этих случаях включенные на фазное напряжение электроприемники могут ока-

заться под междуфазным напряжением. Это приводит к перегоранию электрических ламп и отказам в работе устройств освещения.

Для электрического освещения помещений, зданий и наружных территорий применяются лампы накаливания, газоразрядные лампы низкого давления (ГЛНД) и газоразрядные лампы высокого давления (ГЛВД). При выборе источника света в первую очередь учитывают такие характеристики ламп, как номинальная мощность $P_{ном}$, световой поток Φ , световая отдача H и срок службы T . Значения этих показателей приводятся в справочной литературе при номинальном подведенном напряжении. Однако даже при неизменной величине напряжения на шинах источника питания далеко не все световые приборы работают при номинальном напряжении, так как имеет место потеря напряжения в электрических сетях. Следовательно, фактические характеристики источников света могут отличаться от указанных в справочной литературе, что сказывается на результатах расчета расхода электроэнергии. К сожалению, в технической литературе приводится информация о влиянии напряжения на некоторые технические характеристики отдельных типов источников света, которая в разных источниках может не совпадать и даже быть противоречивой.

Вопросы влияния отклонения напряжения на характеристики разных источников света чрезвычайно важны. В последующих разделах произведены анализ и систематизация информации о влиянии величины напряжения на показатели электропотребления и эксплуатационные характеристики различных ламп с учетом требований действующей нормативно-технической документации.

3.2. Статические характеристики активной мощности световых приборов по напряжению

Мощность световых приборов состоит из мощности, непосредственно потребляемой ИС, и потерь мощности в ПРА. Для газоразрядных ламп электропотребление комплекта «ПРА – лампа» потери активной мощности в ПРА учитываются коэффициентом, на который умножается мощность лампы. Значение этого коэффициента зависит от типа лампы и применяемого ПРА. Потребляемая мощность световых приборов влияет на ток нагрузки осветительных сетей и, следовательно, на тепловой износ изоляции проводников,

который сказывается на надежности систем электрического освещения.

Как известно, все электроприемники, в том числе и световые приборы, обладают регулирующим эффектом нагрузки, под которым понимается изменение потребляемой мощности в процентах при изменении напряжения на 1%. Зависимость потребляемых активной P и реактивной Q мощностей электроприемников от напряжения называется статической характеристикой электрической нагрузки по напряжению.

Для ламп накаливания статическая характеристика активной нагрузки выражается степенной функцией [5,27,28,29]

$$P = P_{ном} \left(\frac{U_y}{U_{ном}} \right)^m, \quad (3.2)$$

где m – показатель, характеризующий регулирующий эффект нагрузки освещения.

В литературных источниках приводятся разные значения показателя m : 1,53 [27]; 1,58 [5]; 1,6 [28,29]. Однако это несущественно влияет на результаты расчета по формуле (3.2), так как при отклонении напряжения от номинального в пределах $\pm 10\%$ значения P при указанных выше величинах m различаются не более чем на 5%. Поэтому для ламп накаливания примем значение $m = 1,58$.

Из формулы (3.1) имеем

$$U_y = U_{ном} + \frac{\delta U}{100} U_{ном}. \quad (3.3)$$

Подставив выражение (3.3) в (3.2), после преобразования получим

$$P = P_{ном} \left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^m. \quad (3.4)$$

Тогда величина, на которую изменяется потребление активной мощности ламп накаливания в процентах от $P_{\text{ном}}$, в зависимости от δU_y вычисляется по формуле

$$\delta P = \left[\left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^m - 1 \right] \cdot 100. \quad (3.5)$$

Статические характеристики нагрузок газоразрядных источников света определяются с учетом применяемых пускорегулирующих аппаратов. Поэтому регулирующий эффект нагрузки для одного и того же типа лампы в зависимости от ПРА может быть разным. Для люминесцентных ламп низкого давления и газоразрядных ламп высокого давления типа ДРИ при использовании электромагнитных ПРА статическая характеристика активной нагрузки может быть представлена в виде линейной зависимости [5,30]

$$P = P_{\text{ном}} \left(1 + \frac{m(U_y - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}} \right), \quad (3.6)$$

где m – расчетный коэффициент, значение которого принимается равным:

2 – для люминесцентных ламп низкого давления; 2,2 – для ламп типа ДРИ.

С учетом выражения (3.3) статическая характеристика (3.6) имеет вид

$$P = P_{\text{ном}} \left(1 + \frac{m\delta U_y}{100} \right). \quad (3.7)$$

Процентное изменение электропотребления осветительными установками с ГЛНД и лампами типа ДРИ в зависимости от величины отклонения напряжения вычисляется по формуле

$$\delta P = m\delta U_y. \quad (3.8)$$

Из газоразрядных источников света высокого давления на производственных предприятиях широкое распространение получили лампы типа ДРЛ. Для этих ламп (в комплекте с ПРА) статическая характеристика активной нагрузки может быть представлена следующей формулой [27,31]:

$$P = P_{\text{ном}} \left(2,43 \frac{U_y}{U_{\text{ном}}} - 1,43 \right). \quad (3.9)$$

Согласно [32] зависимость потребляемой активной мощности от напряжения для ламп типа ДРЛ приблизительно может определяться, как и для газоразрядных ламп низкого давления, по выражению (3.6) при $m = 2$. Сопоставляя результаты расчетов по формулам (3.6) и (3.9), можно сделать вывод о том, что они отличаются незначительно (не более чем на 4%).

Статическую характеристику нагрузки для ламп типа ДРЛ с учетом формулы (3.3) запишем в виде

$$P = P_{\text{ном}} \left(1 + \frac{2,43\delta U_y}{100} \right). \quad (3.10)$$

Величина в процентах, на которую изменяется потребление активной мощности ламп типа ДРЛ в комплекте с ПРА в зависимости от значения отклонения напряжения, определяется по формуле

$$\delta P = 2,43\delta U_y. \quad (3.11)$$

Количественная оценка увеличения или уменьшения потребления электроэнергии осветительными установками с разными типами ламп при отклонении напряжения от номинального производится по выражениям, аналогичным (3.5), (3.8) и (3.11).

На рисунке 3.1 представлены графические зависимости, отражающие изменения потребления активной мощности (электроэнергии), при отклонении подведенного напряжения в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения для разных источников света.

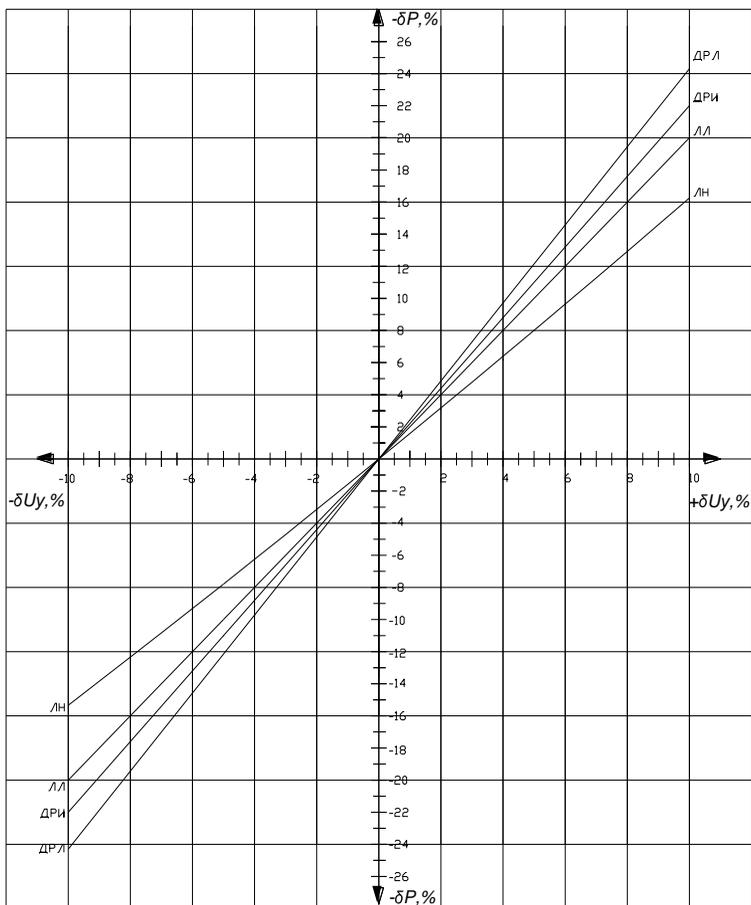


Рис. 3.1 Изменение потребления активной мощности источников света при отклонении напряжения от номинального значения:

ЛН – лампы накаливания; ЛЛ – люминесцентные лампы низкого давления

Как видно из рисунка 3.1, наибольшим регулирующим эффектом по активной мощности обладают газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ и ДРИ.

3.3. Влияние напряжения на световой поток

Световой поток (Φ) является важнейшим техническим параметром источника света, характеризующим мощность его оптического излучения. Этот параметр от ряда факторов, в том числе и от величины напряжения, подведенного к световому прибору. Для ламп накаливания зависимость светового потока от усредненного значения напряжения U_y в точке присоединения светового прибора имеет следующий вид [27,29]:

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left(\frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^n, \quad (3.12)$$

где $\Phi_{\text{ном}}$ – световой поток источника света при номинальном напряжении, люмен (лм).

Значения показателя степени n , приводимые в литературных источниках, несколько различаются: 3,6 [29,32] и 3,67 [27]. С учетом формулы (3.3), определяющей значение U_y , выражение (3.12) представим как

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^n. \quad (3.13)$$

Уменьшение светового потока при отрицательных значениях δU_y и увеличение – при положительных, выраженное в % от номинального значения, определяется следующим образом:

$$\delta\Phi = \left[\left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^n - 1 \right] \cdot 100. \quad (3.14)$$

Расчеты по формуле (3.14) при $n = 3,6$ и $3,67$ показывают, что при изменении δU_y в предельно допустимом диапазоне результаты отличаются не более чем на 3 %. Поэтому в расчетах можно принять значение $n = 3,6$.

Для ГЛНД и ГЛВД зависимость светового потока от напряжения выражается формулой [30,32]

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left(1 + \frac{n(U_y - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}} \right), \quad (3.15)$$

где n – расчетный коэффициент, значение которого принимается равным 1,5 – для ГЛНД; 2,5 – для ламп типа ДРЛ; 3,0 – для ламп типа ДРИ.

С учетом (3.3) выражение (3.15) имеет вид

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left(1 + \frac{n\delta U_y}{100} \right). \quad (3.16)$$

Изменение светового потока газоразрядной лампы при отклонении подведенного напряжения от номинального значения определяется по формуле

$$\delta\Phi = n\delta U_y. \quad (3.17)$$

На рисунке 3.2 показано, как изменяется световой поток в зависимости от отклонения напряжения для различных типов электрических ламп.

Из рисунка 3.2 следует, что в максимальной степени величина отклонения напряжения влияет на световой поток ламп накаливания. В меньшей степени подведенное напряжение сказывается на световом потоке люминесцентных ламп низкого давления.

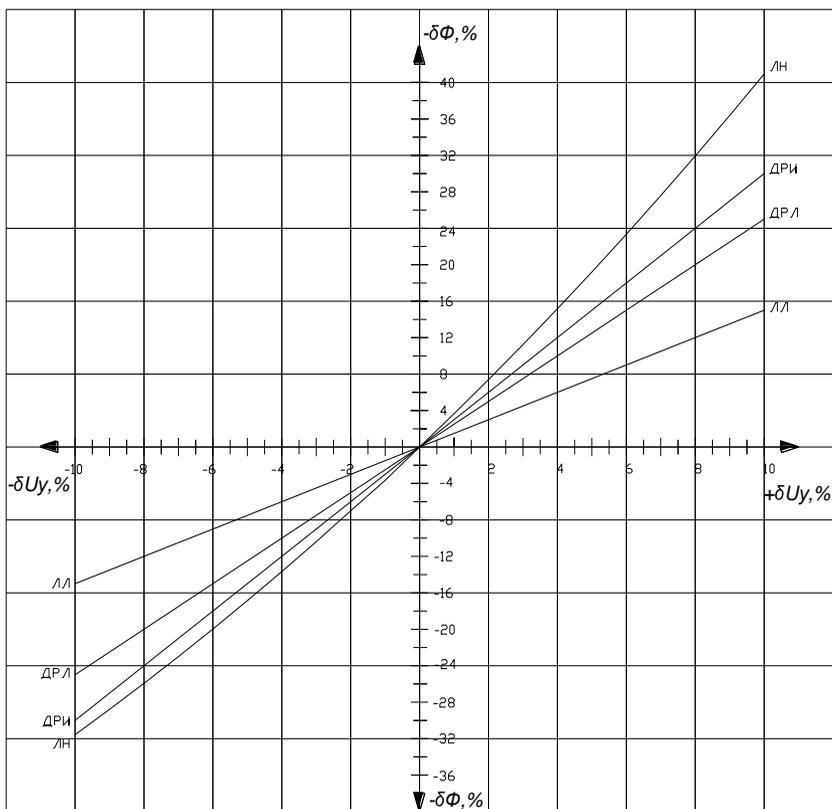


Рис. 3.2 Изменение светового потока источников света при отклонении напряжения от номинального значения

3.4. Зависимость световой отдачи источников света от напряжения

Важнейшим эксплуатационным параметром источника света, определяющим его энергетическую эффективность, является световая отдача, которая рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$H = \frac{\Phi}{P} . \quad (3.18)$$

Подставив выражения (3.12) и (3.2) в (3.18), получим формулу для определения световой отдачи при напряжении U_y для ламп накаливания

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^{n-m},$$

где $H_{\text{ном}}$ – световая отдача лампы при номинальном напряжении, лм/Вт.

При известном значении отклонения напряжения на зажимах светильника световая отдача ламп накаливания вычисляется по формуле

$$H = H_{\text{ном}} \left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^{n-m}.$$

Изменение световой отдачи (%) в зависимости от величины отклонения напряжения для ламп накаливания определяется по выражению

$$\delta H = \left[\left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^{n-m} - 1 \right] \cdot 100. \quad (3.19)$$

Для люминесцентных ламп низкого давления и ламп типа ДРИ выражение световой отдачи в зависимости от величины напряжения выводится путем подстановки (3.15) и (3.6) в (3.18). После выполнения некоторых математических преобразований получаем следующую формулу:

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{nU_y + (1-n)U_{\text{ном}}}{mU_y + (1-m)U_{\text{ном}}} \right). \quad (3.20)$$

При расчете по выражению (3.20) для ГЛНД принимают $n = 1,5$ и $m = 2$, а для ГЛВД типа ДРИ – $n = 3$ и $m = 2,2$.

С учетом формулы (3.3) после преобразования соотношения (3.20) получим

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{1 + \frac{n\delta U_y}{100}}{1 + \frac{m\delta U_y}{100}} \right).$$

Изменение световой отдачи ГЛНД и ламп типа ДРИ, выраженное в процентах, при отклонении напряжения от номинального значения на величину δU рассчитывается по формуле

$$\delta H = \left(\frac{1 + n \frac{\delta U}{100}}{1 + m \frac{\delta U}{100}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (3.21)$$

Для ГЛВД типа ДРЛ с использованием выражений (3.15) и (3.9) световая отдача определяется как

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{2,5U_y - 1,5U_{\text{ном}}}{2,43U_y - 1,43U_{\text{ном}}} \right). \quad (3.22)$$

С учетом (3.3) после преобразования формулы (3.22) получим

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{1 + \frac{2,5\delta U_y}{100}}{1 + \frac{2,43\delta U_y}{100}} \right).$$

Величина, на которую изменяется световая отдача лампы типа ДРЛ при повышении или понижении подведенного напряжения, определяется по формуле

$$\delta H = \left(\frac{1 + 2,5 \frac{\delta U_y}{100}}{1 + 2,43 \frac{\delta U_y}{100}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (3.23)$$

Как показали расчеты по формуле (3.23), световая отдача ламп типа ДРЛ практически не зависит от величины подведенного напряжения. При увеличении напряжения на 10 % световая отдача лампы ДРЛ увеличивается на 0,56 %, а при снижении напряжения на 10 % – уменьшается на 0,93 %.

Рисунок 3.3 дает графическое представление об изменении световой отдачи ламп накаливания, ДРИ и люминесцентных ламп низкого давления при отклонении подведенного напряжения в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения.

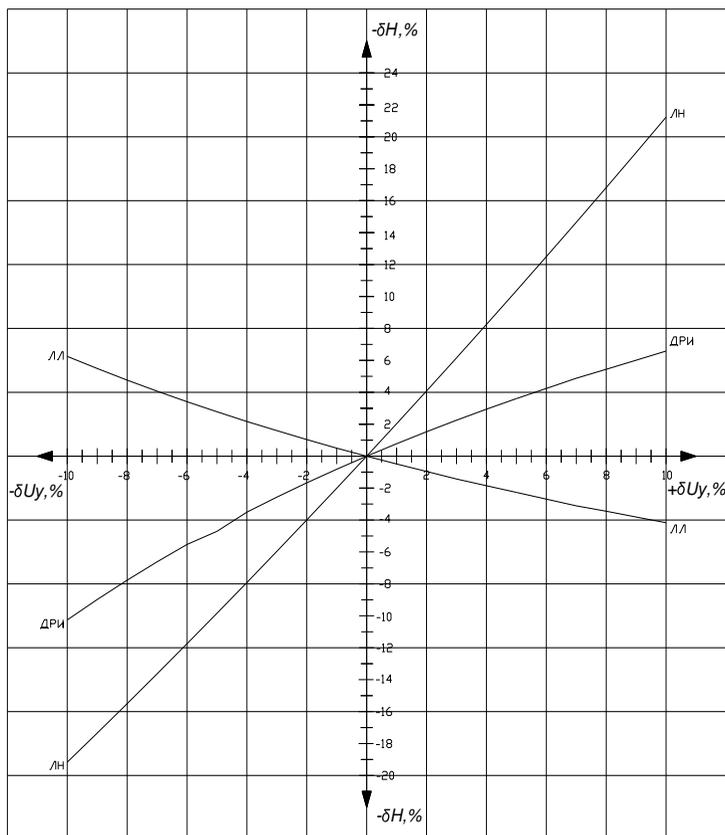


Рис. 3.3 Изменение световой отдачи источников света при отклонении напряжения

Приведенные на рисунке 3.3 зависимости показывают, что в наибольшей степени отклонение напряжения от номинального значения влияет на световую отдачу ламп накаливания, являющихся менее эффективными ИС по сравнению с газоразрядными лампами.

Упростив выражения (3.5), (3.8), (3.11), (3.14), (3.17), (3.19), (3.21), (3.23) и подставив в них принятые значения расчетных коэффициентов, получим формулы для оценки изменения потребляемой активной мощности, светового потока и световой отдачи для различных источников света в зависимости от отклонения питающего напряжения (таблица 3.1).

Таблица 3.1

Аналитические выражения, отражающие изменения характеристик источников света при отклонении напряжения

| Тип источника света | Зависимость изменения параметра от отклонения напряжения, % | | |
|---------------------|---|---|---|
| | Потребляемая активная мощность | Световой поток | Световая отдача |
| Лампа накаливания | $\delta P = \frac{((1 + 0,01\delta U_y)^{1,58} - 1) \cdot}{*100}$ | $\delta \Phi = \frac{((1 + 0,01\delta U_y)^{3,6} - 1) \cdot}{*100}$ | $\delta H = \frac{((1 + 0,01\delta U_y)^{2,02} - 1) \cdot}{*100}$ |
| ГЛНД | $\delta P = 2\delta U_y$ | $\delta \Phi = 1,5\delta U_y$ | $\delta H = \frac{0,5\delta U_y}{1 + 0,02\delta U_y}$ |
| ДРЛ | $\delta P = 2,43\delta U_y$ | $\delta \Phi = 2,5\delta U_y$ | $\delta H = \frac{0,7\delta U_y}{1 + 0,0243\delta U_y}$ |
| ДРИ | $\delta P = 2,2\delta U_y$ | $\delta \Phi = 3\delta U_y$ | $\delta H = \frac{0,8\delta U_y}{1 + 0,022\delta U_y}$ |

3.5. Влияние напряжения на срок службы источников света

Для источников оптического излучения наиболее важным показателем надежности является срок службы. Различают полный срок службы (до перегорания источника света), полезный срок службы (до момента выхода одного из параметров за допустимые

пределы), а также минимальную продолжительность горения, которая определяется с учетом вероятности безотказной работы лампы в течение заданного времени.

Величина напряжения оказывает влияние на срок службы электрических источников света. Согласно ГОСТ 2239–79 [33] для ламп накаливания зависимость продолжения горения T от напряжения определяется следующим выражением:

$$T = T_{л} \left(\frac{U_{л}}{U_{y}} \right)^n, \quad (3.24)$$

где $T_{л}$ – продолжительность горения при заданном напряжении лампы $U_{л}$;

U_{y} - усредненное значение напряжения в рассматриваемой точке сети;

n – показатель, равный 13 – для вакуумных ламп и 14 – для газополных ламп.

С учетом соотношения (3.3), приняв напряжение лампы $U_{л}$ в качестве номинального, получим формулу (3.24) в таком виде:

$$T = T_{л} \left(\frac{1}{1 + \frac{\delta U_{y}}{100}} \right)^n$$

Изменение срока службы ламп накаливания, выраженное в процентах, в зависимости от величины отклонения напряжения δU_{y} , определяется по формуле

$$\delta T = \left(\left(\frac{1}{1 + \frac{\delta U_{y}}{100}} \right)^n - 1 \right) \cdot 100.$$

Отметим, что при повышении подведенного к лампе накаливания напряжения на 5% по отношению к номинальному значению ее срок службы сокращается примерно в два раза. При $U_{y} > 1,1U_{л}$ про-

исходит резкое снижение продолжительности горения ламп накаливания. Понижение подведенного напряжения на 5% почти в два раза увеличивает срок службы лампы. Однако при этом световая отдача ИС снижается примерно на 10%.

Срок службы газоразрядных ламп в зависимости от изменения напряжения определяется в соответствии с выражениями, приведенными в [34]:

1) для ламп типа ДРЛ

$$T = T_{л} \left(5 - 4 \frac{U_y}{U_{ном}} \right), \quad (3.25)$$

2) для люминесцентных ламп низкого давления

$$T = T_{л} \left(4 - 3 \frac{U_y}{U_{ном}} \right). \quad (3.26)$$

С учетом выражения (3.3) формулы для расчета срока службы газоразрядных ламп (3.25) и (3.26) приобретают следующий вид:

1) для ламп типа ДРЛ

$$T = T_{л} \left(1 - 4 \frac{\delta U_y}{100} \right); \quad (3.27)$$

2) для люминесцентных ламп низкого давления

$$T = T_{л} \left(1 - 3 \frac{\delta U_y}{100} \right). \quad (3.28)$$

На основе выражений (3.27) и (3.28) получены формулы, позволяющие оценить изменение продолжительности горения газоразрядных ламп:

1) для ламп типа ДРЛ

$$T = -4\delta U_y; \quad (3.29)$$

2) для люминесцентных ламп низкого давления

$$T = -3\delta U_y. \quad (3.30)$$

Расчеты по формулам (3.29) и (3.30) показывают, что по сравнению с лампами накаливания срок службы газоразрядных ламп в меньшей степени зависит от величины подведенного напряжения.

Так, например, при повышении напряжения на 5% относительно номинального значения продолжительность горения ламп типа ДРЛ сокращается на 20%, а люминесцентных ламп низкого давления – на 15%.

На рисунке 3.4 приведены кривые, отражающие изменение срока службы ламп накаливания газополных (ЛНГ) и вакуумных (ЛНВ), типа ДРЛ и люминесцентных низкого давления в зависимости от отклонения напряжения.

Уместно отметить, что для газоразрядных ламп в литературных источниках дается противоречивая информация о сроке службы ламп в зависимости от напряжения сети. Например, в [30] отмечается, что срок службы люминесцентных ламп низкого давления изменяется на 1,5–3%, а типа ДРЛ – на 3,5% в противоположную сторону на каждый процент изменения напряжения питания. Информации, касающейся срока службы ламп типа ДРИ, не имеется, так как их эксплуатационные характеристики недостаточно изучены.

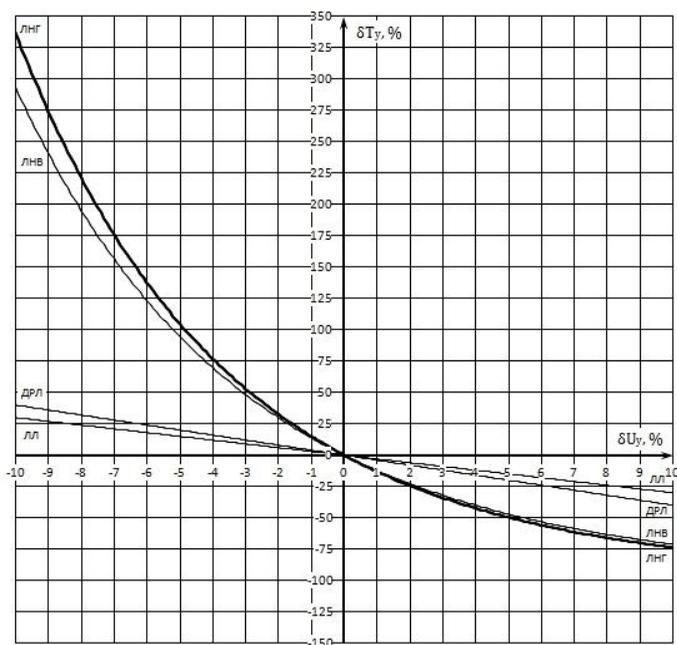


Рис. 3.4 Изменение срока службы различных типов источников света при отклонении напряжения

Согласно [5,6,32] срок службы люминесцентных ламп и ламп типа ДРЛ сокращается как при положительных, так и при отрицательных отклонениях напряжения. В среднем при $\delta U = \pm 10\%$ срок службы люминесцентных ламп сокращается на 20–25 % [5]. Продолжительность горения газоразрядных ламп снижается при частых включениях и отключениях. Таким образом, для газоразрядных ламп не установлен единый закон изменения срока службы в зависимости от величины напряжения.

4. ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКА СВЕТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

4.1. Общая характеристика световых приборов как потребителей электроэнергии

Потребление активной мощности лампами накаливания при отклонении подведенного напряжения U от номинального значения $U_{\text{ном}}$ изменяется в соответствии с их статическими характеристиками [5,31]. Данные источники света не потребляют реактивную мощность и не генерируют высшие гармоники тока и напряжения. Это является несомненным достоинством ламп накаливания. Однако низкая световая отдача и относительно небольшой средний срок службы делает их неконкурентоспособными по сравнению с газоразрядными лампами.

На промышленных предприятиях и в общественных зданиях в качестве источников света в подавляющем большинстве случаев используются экономичные газоразрядные лампы высокого и низкого давления. Световые приборы с газоразрядными лампами наряду с активной мощностью потребляют также и реактивную мощность, которая может быть значительной, если не применить специальных мер по ее снижению. Кроме того, они являются электроприемниками с нелинейными вольтамперными характеристиками, что вызывает появление в электрических сетях осветительных установок высших гармонических составляющих тока и напряжения. Реактивные токи, токи высших гармоник и потери в ПРА создают дополнительную нагрузку элементов электрической сети. Это приводит к увеличению затрат на сооружение и эксплуатацию осветительных установок.

В осветительных установках, в отличие от силовых сетей, к трехфазным линиям, как правило, присоединяются однофазные электроприемники. При этом электрические лампы включаются в сеть между фазами L_1 , L_2 и L_3 и нулевым рабочим проводником N по схеме звезды (рис. 4.1) [5].

При такой схеме все три фазы работают относительно независимо друг от друга и могут включаться и отключаться по отдельности.

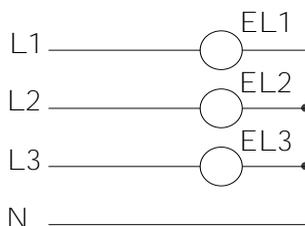


Рис. 4.1 Включение ламп на фазное напряжение по схеме «звезда»:
EL1–EL3 – электрические лампы

В случае равенства нагрузок всех фаз и применения ламп накаливания в нулевом проводнике ток отсутствует. При использовании для освещения световых приборов с газоразрядными лампами в нулевом проводнике линии будет протекать ток высших гармоник.

В случае неравномерной загрузки фаз в нулевом рабочем проводнике протекает уравнивающий ток, что вызывает некоторое изменение значений фазных напряжений. При обрыве нулевого рабочего проводника существенно нарушается распределение линейного напряжения между нагрузками различных фаз.

При проектировании и эксплуатации осветительных установок реактивная нагрузка световых приборов учитывается приближенно, а токи высших гармоник, как правило, не принимаются во внимание. Это может привести к снижению эффективности и надежности электрических сетей систем электрического освещения.

Световые приборы представляют собой однофазную нагрузку. В то же время благодаря незначительной мощности осветительных электроприемников (единичная номинальная мощность ламп, как правило, не более 2 кВт) при правильной группировке световых приборов в сети электрического освещения можно достичь достаточно равномерной загрузки фаз (с несимметрией не более 5-10%). Характер нагрузки, создаваемой световыми приборами, достаточно ровный, без толчков. Значение нагрузки изменяется в зависимости от времени суток, года и географического расположения объекта, использующего электрическое освещение. Коэффициент мощности нагрузки ($\cos\varphi$) для ламп накаливания равен единице, а для газоразрядных ламп с использованием некомпенсированных ПРА – 0,5-0,6.

При применении газоразрядных ламп в проводниках сети, особенно нулевых рабочих (N - в системах заземления $TN-S$ и $TN-C-S$, PEN - в системе $TN-C$), имеют место высшие гармоники тока и напряжения. Это необходимо учитывать при расчете систем электрического освещения.

Величина подведенного напряжения оказывает влияние на показатели электропотребления (активную, реактивную и полную мощность, ток, коэффициент мощности) газоразрядных ламп. Зависимость потребляемой мощности электроприемников от напряжения можно проанализировать с помощью статических характеристик.

Статические характеристики по активной мощности ламп типа ДРЛ, ДРИ и ЛЛНД приводятся в разных литературных источниках [5,28,31]. Отсутствует такая информация для натриевых ламп типа ДНаТ, ксеноновых ламп и светодиодных источников света.

Газоразрядные лампы в комплекте с электромагнитными ПРА потребляют значительную реактивную мощность. В то же время статические характеристики по реактивной мощности для газоразрядных ламп изучены недостаточно. В [28] имеется некоторая информация по регулируемому эффекту по реактивной мощности только для ламп типа ДРЛ и ЛЛНД. В доступной технической литературе нет данных, которые позволяли бы оценить изменение тока в осветительной сети в зависимости от напряжения.

Световые приборы, потребляя активную и реактивную мощности, значения которых зависят от величины подведенного к источникам света напряжения, оказывают влияние на эффективность работы осветительных установок. В связи с этим представляет интерес исследование режимов электропотребления светильников с газоразрядными лампами в зависимости от напряжения.

4.2. Определение показателей электропотребления газоразрядных источников света опытным путем

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований зависимости от напряжения показателей электропотребления ламп типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ, а также компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), как интегрированных, так и неинтегрированных.

Исследование зависимостей активной P , реактивной Q и полной S мощности, тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от подведенного напряжения проводилось на лабораторной установке, электрическая схема которой приведена на рисунке 4.2.

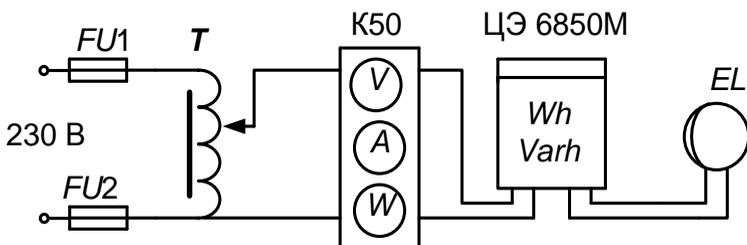


Рис. 4.2 Схема установки для измерений показателей электропотребления электрических газоразрядных ламп

В установке основным измерительным прибором является трехфазный многофункциональный электронный счетчик типа ЦЭ6850М прямого включения (без измерительных трансформаторов тока). Класс точности счетчика по активной энергии -1, по реактивной энергии -2. Счетчик ЦЭ6850М, кроме учета активной и реактивной энергии, позволяет определять фазные и междуфазные напряжения сети, активную, реактивную и полную мощности, коэффициент активной мощности нагрузки $\cos \varphi$. Светильники с газоразрядными лампами EL подключаются непосредственно к счетчику.

Для того, чтобы избежать грубых ошибок измерения, подводимое напряжение, потребляемая активная мощность и ток нагрузки световых приборов дополнительно контролируется с помощью измерительного комплекта типа K50.

При определении показателей электропотребления напряжение на зажимах световых приборов изменялось в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения (220 или 230В) с помощью лабораторного автотрансформатора T , включенного в цепь питания светового прибора. Результаты измерений приведены в таблицах П1-П6.

Надежность и эффективность работы электрических сетей осветительных установок в значительной степени зависит от тока на-

грузки, возникающего в элементах сети при включении приборов искусственного освещения. Превышение величины допустимого тока вызывает ускоренный тепловой износ изоляции проводников и отказы в работе электрических сетей. В связи с этим значительный интерес представляет зависимость от напряжения тока в электрических цепях при работе газоразрядных ламп разных типов.

В процессе измерений фиксируются технические характеристики не одной лампы, а всего комплекта «ПРА-лампа». При этом i -е значение тока нагрузки связано с другими показателями электропотребления такими соотношениями:

$$I_i = \frac{P_i}{U_i \cos \varphi_i} ;$$

$$I_i = \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{U_i} ;$$

$$I_i = \frac{S_i}{U_i} ,$$

где P_i , Q_i и S_i – соответственно активная (Вт), реактивная (вар) и полная (В·А) мощность, потребляемая комплектом «ПРА-лампа» при i -м измерении;

U_i - значение подведенного фазного напряжения при i -м измерении, В;

$\cos \varphi_i$ - коэффициент мощности светильника при подведенном напряжении.

Расчеты по приведенным выше формулам показывают хорошую согласованность полученных экспериментальным путем показателей электропотребления световых приборов.

4.3. Анализ экспериментальных данных, отражающих зависимость показателей электропотребления газоразрядных источников света от напряжения

Проанализируем приведенные в таблицах П1-П6 показатели электропотребления газоразрядных ламп, полученные в результате эксперимента, по активной (P), реактивной (Q) и полной мощности (S) и току (I). Результаты анализа сведем в таблицы 4.1-4.4. В результирующих таблицах 4.1-4.4 указаны номинальные мощности ($P_{ном}$) и напряжения ($U_{ном}$) ламп, а также максимальные и минимальные значения подведенного напряжения (U_{min} , U_{max}) и измененного параметра электропотребления (активной мощности - P_{min} , P_{max} ; реактивной мощности - Q_{min} , Q_{max} ; полной мощности - S_{min} , S_{max} и тока - I_{min} , I_{max}).

В таблицах указаны также потребляемые при номинальном напряжении лампы активная ($P_{ном}$), реактивная ($Q_{ном}$) и полная ($S_{ном}$) мощность, а также ток ($I_{ном}$) комплекта «ПРА-лампа». Для неинтегрированной КЛЛ указанные выше показатели определены методом линейной интерполяции. Минимальные и максимальные значения исследуемых показателей, выраженные в процентах, даны по отношению к параметрам электропотребления $P_{ном}$, $Q_{ном}$, $S_{ном}$ и $I_{ном}$. Например, для активной мощности

$$P_{min}\% = P_{min} / P_{ном} \cdot 100;$$

$$P_{max}\% = P_{max} / P_{ном} \cdot 100 .$$

Аналогично определяются значения $Q_{min}\%$, $Q_{max}\%$, $S_{min}\%$, $S_{max}\%$, $I_{min}\%$ и $I_{max}\%$.

Данные, приведенные в таблице 4.1, показывают, что по активной мощности наиболее чувствительны к изменению напряжения газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ. Лучшими показателями по потреблению активной мощности обладают компактные люминесцентные лампы и металлогалогенные лампы типа ДРИ.

Таблица 4.1

Потребляемая активная мощность комплекта «ПРА-лампа»
с разными источниками света

| Тип лампы | $P_{ном}, В$ _т | $U_{ном}, В$ | $P_{пном}, В$ _т | Напряже- ние, В | | Активная мощность, В т | | Активная мощность, % | |
|-------------------------|---------------------------|--------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|-----------|----------------------------|----------------|
| | | | | U_{min} | $U_{ма}$ _х | P_{min} | P_{max} | P_{min} % | P_{max} % |
| ДРЛ | 125 | 220 | 139,5 | 207,0 | 253,0 | 119,1 | 191,0 | 85,4 | 136,9 |
| ДРИ (комп. ПРА) | 250 | 230 | 264,9 | 207,1 | 254,0 | 214,4 | 323,0 | 80,9 | 116,0 |
| ДНаТ | 250 | 220 | 299,7 | 207,8 | 253,9 | 234,5 | 372,6 | 78,2 | 124,3 |
| ДНаТ (комп. ПРА) | 125 | 230 | 167,1 | 207,0 | 253,9 | 130,9 | 210,9 | 78,3 | 126,2 |
| КЛЛ (интегр.) | 15 | 230 | 14,76 | 206,3 | 254,0 | 13,3 | 16,48 | 90,1 | 117,7 |
| КЛЛ (неин- тегр.) | 11 | 220 | 12,36 | 207,0 | 252,8 | 14,4 | 0,119 | 94,1 | 116,5 |

Наиболее широкий диапазон потребления реактивной мощности при изменении величины подведенного напряжения имеют световые приборы с лампами типа ДРИ и компенсированным ПРА (таблица 4.2).

Таблица 4.2

Потребляемая реактивная мощность комплекта «ПРА-лампа»
с разными источниками света

| Тип лампы | $P_{ном}, В$ _т | $U_{ном}, В$ | $Q_{пном}, вар$ | Напряжение, В | | Реактивная мощность, вар | | Реактивная мощ- ность, % | |
|-----------------------|---------------------------|--------------|-----------------|---------------|-----------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|----------------|
| | | | | U_{min} | U_{max} | Q_{min} | Q_{max} | Q_{min} % | Q_{max} % |
| ДРЛ | 125 | 220 | 202,5 | 207,0 | 253,0 | 163,5 | 316,0 | 80,7 | 156,0 |
| ДРИ (комп. ПРА) | 250 | 230 | 72,5 | 207,1 | 254,0 | 42,2 | 138,6 | 58,2 | 191,2 |
| ДНаТ | 250 | 220 | 527,3 | 207,8 | 253,9 | 484,1 | 672,8 | 91,8 | 127,6 |

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|
| ДНаТ (комп. ПРА) | 125 | 230 | 51,6 | 207,0 | 253,9 | 36,3 | 79,8 | 70,7 | 154, 7 |
| КЛЛ (ин- тегр.) | 15 | 230 | 22,79 | 206,3 | 254,0 | 20,25 | 25,94 | 88,9 | 113, 8 |
| КЛЛ (неин- тегр.) | 11 | 220 | 22,09 | 207,0 | 252,8 | 20,45 | 26,49 | 89,3 | 119, 9 |

Светильники с лампами типа ДРИ и ДНаТ (в случае использования компенсированного ПРА) также существенно изменяют величину потребляемой реактивной мощности при отклонении напряжения от номинального значения. В лучшую сторону в этом отношении выделяются КЛЛ.

Таблица 4.3

Потребляемая полная мощность комплекта «ПРА-лампа» с разными источниками света

| Тип лампы | $P_{ном}$, Вт | $U_{ном}$, В | $S_{нон}$, мВ·А | Напряжение, В | | Полная мощность, В·А | | Полная мощность, % | |
|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------------|-----------|----------------------|-----------|--------------------|----------------|
| | | | | U_{min} | U_{max} | S_{min} | S_{max} | S_{min} % | S_{max} % |
| ДРЛ | 125 | 220 | 245,9 | 202,3 | 365,3 | 163,5 | 316,0 | 82,3 | 148,6 |
| ДРИ (комп. ПРА) | 250 | 230 | 273,8 | 207,1 | 254,0 | 218,5 | 351,5 | 79,8 | 128,4 |
| ДНаТ | 250 | 220 | 592,4 | 207,8 | 253,9 | 537,9 | 769,1 | 90,8 | 129,8 |
| ДНаТ (комп. ПРА) | 125 | 230 | 174,9 | 207,0 | 253,9 | 135,8 | 225,5 | 77,6 | 128,9 |
| КЛЛ (ин- тегр.) | 15 | 230 | 27,15 | 206,3 | 254,0 | 24,23 | 30,73 | 88,9 | 113,8 |
| КЛЛ (не- интегр.) | 11 | 220 | 22,09 | 207,0 | 252,8 | 20,45 | 26,49 | 89,3 | 119,9 |

При варьировании величины напряжения в максимальной степени изменяется полная мощность световых приборов с лампами типа ДРЛ и меньше всего компактных люминесцентных ламп (таблица 4.3).

Таблица 4.4

Ток нагрузки комплекта «ПРА-лампа» с разными источниками света

| Тип лампы | $P_{ном}$ Вт | $U_{ном}$ В | $I_{ном}$ А | Напряжение, В | | Ток, А | | Ток, % | |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| | | | | U_{min} | U_{max} | I_{min} | I_{max} | I_{min} % | I_{max} % |
| ДРЛ | 125 | 220 | 1,12 | 207,0 | 253,0 | 0,98 | 1,46 | 87,5 | 130,4 |
| ДРИ (комп. ПРА) | 250 | 230 | 1,19 | 207,1 | 254,0 | 1,06 | 1,38 | 89,1 | 116,0 |
| ДНаТ | 250 | 220 | 2,69 | 207,8 | 253,9 | 2,59 | 3,03 | 96,3 | 117,0 |
| ДНаТ (комп. ПРА) | 125 | 230 | 0,75 | 207,0 | 253,9 | 0,66 | 0,89 | 88,0 | 118,7 |
| КЛЛ (ин- тегр.) | 15 | 230 | 0,117 | 206,3 | 254,0 | 0,117 | 0,121 | 100,0 | 103,4 |
| КЛЛ (неин- тегр.) | 11 | 220 | 0,115 | 207,0 | 252,8 | 0,113 | 0,119 | 98,3 | 103,4 |

Анализ данных таблицы 4.4 показывает, что при повышении напряжения в максимальной степени увеличивается ток комплекта «ПРА-лампа» при использовании ламп типа ДРЛ. Менее всего изменяется ток при применении компактных люминесцентных ламп. Отметим, что для ламп типа ДНаТ в случае применения компенсированного ПРА при изменении подведенного напряжения ток нагрузки варьируется в более широком диапазоне. Отсюда можно сделать вывод о необходимости обеспечения требуемых режимов напряжения для предотвращения превышения токовых нагрузок электрических сетей сверх допустимых значений и повышения надежности их работы при использовании для освещения газоразрядных ламп высокого давления.

КЛЛ менее требовательны к качеству подводимого напряжения. При выполнении измерений интегрированная КЛЛ погасала при напряжении 100 В и загоралась при 124 В.

4.4. Статистическая оценка показателей электропотребления газоразрядных ламп в зависимости от напряжения

На основе полученных статистических данных можно получить аппроксимирующие функции, позволяющие производить приближенную оценку показателей электропотребления газоразрядных ламп в зависимости от напряжения.

Статистические данные образуют область экспериментальных точек, соответствующих показателям электропотребления комплектов «ПРА-лампа» при определенных значениях подведенного напряжения. Резко неравномерного распределения экспериментальных точек внутри полученных областей для разных типов источников света не наблюдается (таблицы П1-П6), что свидетельствует о репрезентативности исходных данных.

Для получения аппроксимирующих выражений использовалась компьютерная программа сглаживания экспериментальных зависимостей функции с двумя неизвестными параметрами, разработанная на кафедре «Электроснабжение» БНТУ. Программа позволяет выявлять связь между зависимой (y) и независимой (x) переменными. С помощью данной программы можно производить точечную и интервальную оценку параметров электропотребления световых приборов.

Точечная оценка исследуемого параметра представляет собой его осредненное значение на некотором интервале времени. Она представляет собой результат сглаживания экспериментальных зависимостей функциями $y_i=f(x_i, a, b, c, \dots)$, обеспечивающими минимум среднего квадрата ошибки [35]

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a, b, c, \dots)]^2, \quad (4.1)$$

где n – число экспериментальных точек (измерений);

y_i и x_i – совокупность экспериментальных пар чисел;

a, b, c – параметры сглаживания, подлежащие определению в результате расчета.

В программе в качестве сглаживающих рассматриваются следующие функции:

- линейная

$$\bar{y} = a + bx;$$

- степенная

$$\bar{y} = ax^b;$$

- экспоненциальная

$$\bar{y} = ae^{bx};$$

- гиперболическая

$$\bar{y} = a + b/x;$$

- параболическая

$$\bar{y} = a + bx + cx^2.$$

В качестве интервальной оценки принимается диапазон $\bar{y} \pm \beta\sigma$, где \bar{y} представляет собой аппроксимированное (сглаженное) значение исследуемого показателя, т.е. является точечной оценкой. Значение квантиля $\beta=3$ при нормальном законе распределения случайной величины y практически гарантирует с вероятностью 0,997 попадание всех учитываемых точек в указанный выше диапазон [35].

Выбор сглаживающей функции производится по критерию минимума σ^2 .

В качестве зависимой переменной y рассматривались параметры электропотребления P , Q , S и I , а независимой x – напряжение U . Для того, чтобы сглаживающие зависимости можно было бы применять для любых номинальных мощностей ламп определенного типа, следует использовать статистические данные, выраженные в относительных единицах измерения. В этом случае

$$x_i = \frac{U_i}{U_{ном}};$$

$$y_i = \left\{ \frac{P_i}{P_{ном}}; \frac{Q_i}{Q_{ном}}; \frac{S_i}{S_{ном}}; \frac{I_i}{I_{ном}} \right\}.$$

Тогда, получив аппроксимирующую функцию, например, для относительной потребляемой мощности

$$\frac{P}{P_{\text{н.ю.м}}} = f\left(\frac{U_i}{U_{\text{н.ю.м}}}, a, b, c, \dots\right),$$

можно перейти к выражению для расчета абсолютного значения данного показателя электропотребления в именованных единицах

$$P = P_{\text{н.ю.м}} \cdot f\left(\frac{U_i}{U_{\text{н.ю.м}}}, a, b, c, \dots\right).$$

Среднее значение квадрата ошибки в относительных единицах можно рассчитать по формуле, аналогичной (4.1). Для интервальной оценки параметров электропотребления в зависимости от напряжения необходимо знать среднюю ошибку, выраженную в именованных единицах измерения. Приблизительно ее можно найти, умножив σ , на значение показателя электропотребления при номинальном напряжении лампы $U_{\text{н.ю.м}}$.

Результаты расчета сглаживающих функций экспериментальных зависимостей показателей электропотребления от напряжения для световых приборов с разными типами газоразрядных ламп приведены в таблицах 4.5-4.9.

Таблица 4.5

Аппроксимирующие функции для оценки параметров
электропотребления световых приборов с лампами типа ДРЛ

| Параметр электропо- требления | Аппроксимирующая функция | Средняя относи- тельная ошибка σ_* |
|--|--|---|
| Потребляе- мая активная мощность, Вт | $\bar{P} =$ $P_{\text{нном}} (2,579(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 0,066(\frac{U}{U_{\text{ном}}})^2 - 1,$ | 0,003309 |
| | $\bar{P} = P_{\text{нном}} (2,44(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 1,44)$ | 0,003324 |
| Потребляе- мая реак- тивная мощ- ность, вар | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} (3,59(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 2,59)$ | 0,00806 |
| Потребляе- мая полная мощность, В·А | $\bar{S} =$ $S_{\text{нном}} (0,37(\frac{U}{U_{\text{ном}}})^2 + 2,419(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 1,$ | 0,00436 |
| | $\bar{S} = S_{\text{нном}} (3,19(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 2,19)$ | 0,00454 |
| Ток, А | $\bar{I} = I_{\text{нном}} (2,04(\frac{U}{U_{\text{ном}}}) - 1,04)$ | 0,00588 |

Таблица 4.6

Аппроксимирующие функции для оценки параметров
электропотребления световых приборов с лампами типа ДРИ и
компенсированными ПРА

| Параметр электропотребления | Аппроксимирующая функция | Средняя относительная ошибка σ_* |
|---------------------------------------|---|---|
| Потребляемая активная мощность, Вт | $\bar{P} =$ $P_{\text{нном}} \left(0,707 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + 0,592 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,00378 |
| | $\bar{P} = P_{\text{нном}} \left(2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1 \right)$ | 0,00463 |
| Потребляемая реактивная мощность, вар | $\bar{Q} =$ $Q_{\text{нном}} \left(22,322 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 37,921 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,02939 |
| | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} \left(6,799 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 5,698 \right)$ | 0,09092 |
| Потребляемая полная мощность, В·А | $\bar{S} =$ $S_{\text{нном}} \left(2,924 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 3,472 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,00416 |
| | $\bar{S} = S_{\text{нном}} \left(2,386 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1,366 \right)$ | 0,01198 |

| | | |
|--------|--|----------|
| Ток, А | $\bar{I} = I_{\text{нном}} \left(1,301 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 1,254 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,003556 |
| | $\bar{I} = I_{\text{нном}} \left(1,353 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,337 \right)$ | 0,006132 |

Таблица 4.7

Аппроксимирующие функции для оценки параметров электропотребления световых приборов с лампами типа ДНаТ и некомпенсированными ПРА

| Параметр электропотребления | Аппроксимирующая функция | Средняя относительная ошибка σ_* |
|---------------------------------------|--|---|
| Потребляемая активная мощность, Вт | $\bar{P} = P_{\text{нном}} \left(1,183 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 0,063 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,005682 |
| | $\bar{P} = P_{\text{нном}} \left(2,42 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1,42 \right)$ | 0,007298 |
| Потребляемая реактивная мощность, вар | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} \left(0,327 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + 1,116 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,01006 |
| | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} \left(1,8 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,8 \right)$ | 0,01013 |

| | | |
|---|--|----------|
| Потребляемая полная мощ- ность, В·А | $\bar{S} =$ $S_{\text{пном}} \left(0,517 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + 0,845 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right)$ | 0,007987 |
| | $\bar{S} = S_{\text{пном}} \left(1,93 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,93 \right)$ | 0,008223 |
| Ток, А | $\bar{I} =$ $I_{\text{пном}} \left(1,36 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,245 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - \right)$ | 0,072763 |
| | $\bar{I} = I_{\text{пном}} \left(0,84 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 0,16 \right)$ | 0,007348 |

Таблица 4.8

Аппроксимирующие функции для оценки параметров
электропотребления световых приборов с лампами типа ДНаТ
и компенсированными ПРА

| Параметр элек- тропотребле- ния | Аппроксимирующая функция | Средняя относи- тельная ошибка σ_* |
|--|--|---|
| Потребляемая активная мощ- ность, Вт | $\bar{P} = P_{\text{пном}} \left(2,149 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - \right.$ $\left. - 1,925 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 0,775 \right)$ | 0,007087 |
| | $\bar{P} = P_{\text{пном}} \left(2,37 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1,37 \right)$ | 0,010504 |

| | | |
|---------------------------------------|--|----------|
| Потребляемая реактивная мощность, вар | $\bar{Q} = Q_{\text{пн.ом}} \left(16,429 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 28,882 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 13,416 \right)$ | 0,023848 |
| | $\bar{Q} = Q_{\text{пн.ом}} \left(3,95 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 2,93 \right)$ | 0,063211 |
| Потребляемая полная мощность, В·А | $\bar{S} = 0,0813 e^{2,506 \frac{U}{U_{\text{ном}}}}$ | 0,007493 |
| | $\bar{S} = S_{\text{пн.ом}} \left(2,51 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1,51 \right)$ | 0,014727 |
| Ток, А | $\bar{I} = I_{\text{пн.ом}} \left(2,167 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 2,862 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 1,69 \right)$ | 0,008812 |
| | $\bar{I} = I_{\text{пн.ом}} \left(1,47 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,47 \right)$ | 0,011727 |

Интегрированные и неинтегрированные КЛЛ отличаются только конструктивным исполнением ПРА. Поэтому для этих источников света исходные данные, характеризующие их электропотребление, были объединены в одну группу, для которой получены сглаживающие функции, приведенные в таблице 4.9.

Таблица 4.9

Аппроксимирующие функции для оценки параметров
электропотребления световых приборов с компактными
люминесцентными лампами

| Параметр электропотребления | Аппроксимирующая функция | Средняя относительная ошибка σ_* |
|---------------------------------------|--|---|
| Потребляемая активная мощность, Вт | $\bar{P} = P_{\text{нном}} \left(0,636 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 0,225 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 0,589 \right)$ | 0,003716 |
| | $\bar{P} = P_{\text{нном}} \left(1,07 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,07 \right)$ | 0,004762 |
| Потребляемая реактивная мощность, вар | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} \left(1,169 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 1,114 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 0,943 \right)$ | 0,004291 |
| | $\bar{Q} = Q_{\text{нном}} \left(1,27 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,27 \right)$ | 0,00708 |
| Потребляемая полная мощность, В·А | $\bar{S} = S_{\text{пном}} \left(0,849 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 0,523 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) + 0,673 \right)$ | 0,003621 |
| | $\bar{S} = S_{\text{пном}} \left(1,21 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,21 \right)$ | 0,005587 |

| | | |
|--------|--|----------|
| Ток, А | $\bar{I} = I_{\text{н.ом}} \left(0,779 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 - 1,402 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 1,625 \right)$ | 0,006264 |
| | $\bar{I} = I_{\text{н.ом}} \left(0,19 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) - 0,81 \right)$ | 0,007307 |

В таблицах 4.5-4.9 приведены наиболее точные сглаживающие функции для оценки показателей электропотребления световых приборов с газоразрядными источниками света. Так как для практического использования более удобными являются линейные функции, то они также представлены в указанных таблицах наряду с формулами, обеспечивающими наименьшие значения σ^* . Расчеты по приведенным в таблицах 4.5-4.9 линейным аппроксимирующим уравнениям позволяют получать вполне приемлемые результаты.

Анализ полученных формул, показывает, что в большинстве случаев наиболее точными являются параболические сглаживающие функции. Исключение составляют световые приборы с лампами типа ДРЛ (таблица 4.5), у которых для расчета потребляемой реактивной мощности и тока лучшими являются линейные уравнения, а также с лампами типа ДНаТ и компенсированным ПРА (таблица 4.8), полная мощность которых наиболее точно определяется помощью экспоненциальной сглаживающей функции.

Отметим, что полученные линейные аппроксимирующие функции для расчета потребляемой активной мощности световых приборов с газоразрядными лампами высокого давления типа ДРЛ, ДРИ и ДНаТ отличаются незначительно.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации осветительных установок разнообразных производственных и коммунально-бытовых объектов для оценки показателей электропотребления газоразрядных ламп высокого давления и КЛЛ при изменении напряжения в системах электрического освещения. Знание этих показателей позволит разрабатывать и реализовывать мероприятия, направленные на повышение

надежности и эффективности работы электрических сетей осветительных установок.

4.5. Световые приборы как источники высших гармоник

Световые приборы с газоразрядными лампами и тиристорные ограничители перенапряжения (ТОН), применяемые в осветительных сетях, представляют собой электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками. Такие электроприемники потребляют из сети несинусоидальные токи при подведении к их зажимам синусоидального напряжения. Несинусоидальные токи, протекая по элементам электрической сети, создают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов и приводят к искажениям формы кривой напряжения в точках подключения световых приборов [37].

Несинусоидальные кривые токов и напряжений можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из простых гармонических колебаний разных частот. Известно, что любая периодическая функция $f(\omega t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле (т.е. являющаяся ограниченной, кусочно-непрерывной, имеющая на протяжении периода ограниченное количество экстремумов), может быть представлена в виде тригонометрического ряда Эйлера-Фурье [36,37]:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)), \quad (4.2)$$

где A_0 – постоянная составляющая (нулевая гармоника);

k – номер гармоники;

a_k, b_k – коэффициенты ряда Эйлера-Фурье;

ω – основная частота, $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

T – период несинусоидальной функции.

При $k = 1$ из выражения (4.2) определяется гармоника, называемая первой или основной. Остальные члены ряда, соответствующие $k > 1$, называются высшими гармониками.

Электрические сети осветительных установок промышленных предприятий, как правило, являются трехфазными. Рассмотрим высшие гармоники в трехфазных сетях и их классификацию.

Пусть для фазы A k -я гармоника напряжения определяется по формуле

$$U_{Ak} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где U_{km} - максимальное значение (амплитуда) напряжения k -й гармоники;

φ_k - угол начальной фазы k -й гармоники.

Тогда с учетом того, что $\omega t = 2\pi$, для k -х гармонических напряжений фаз B и C соответственно можно записать

$$U_{Bk} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3} k);$$

$$U_{Ck} = U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3} k).$$

Всю совокупность гармоник от 0 до ∞ в зависимости от их порядковых номеров можно распределить по трем группам. В первую группу входят гармоники, имеющие порядковые номера

$$k = 3n + 1,$$

где n – последовательный ряд чисел ($n=0,1,2,3,\dots$).

Гармоники данной группы образуют симметричные системы напряжений, последовательность которых соответствует последовательности фаз первой (основной) гармоники, т.е. они образуют симметричные системы напряжений прямой последовательности.

Ко второй группе относятся высшие гармоники с порядковыми номерами, определяемыми по выражению

$$k = 3n + 2.$$

Гармоники этой группы образуют симметричные системы напряжений обратной последовательности.

Третью группу составляют гармоники, у которых порядковый номер

$$k = 3n.$$

Векторы напряжений данной группы во всех фазах в любой момент времени имеют одинаковые модули и направления, т.е. гармоники третьей группы образуют системы нулевой последовательности.

Большинство высших гармоник, в основном, самокомпенсируются в нейтрали и их воздействие на электрические сети практически не проявляется. Это не относится к нечетным гармоникам, кратным трем (3-й, 9-й, 15-й, 21-й, ..., 39-й), порядок которых вычисляется по формуле

$$k = 3(2n + 1).$$

Гармонические составляющие тока, нечетные кратные трем, определяющие высокое значение амплитуды тока и генерируемые однофазными нелинейными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В трехфазных цепях они совпадают по фазе и образуют систему нулевой последовательности. В этом случае нечетные гармоники, кратные трем, суммируются в нулевом рабочем проводнике и определяются по формуле [36].

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots},$$

где I_3, I_9, I_{15}, \dots – действующие значения соответствующих гармоник тока.

На рисунке 4.3 приведена графическая иллюстрация формирования тока в нулевом рабочем проводнике N из-за наличия нечетных гармоник, кратных трем. Они имеют меньшую амплитуду по отношению к току первой гармоники (основной частоты) и совпадают по фазе.

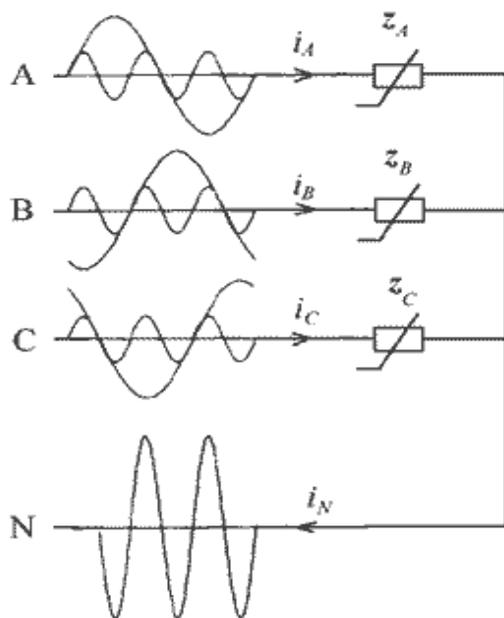


Рис. 4.3 Формирование тока в нулевом рабочем проводнике при нелинейной нагрузке:

i_A, i_B, i_C – токи фаз A, B и C ; i_N – ток в нулевом рабочем проводнике;

Z_A, Z_B, Z_C – нелинейные полные сопротивления нагрузок фаз A, B и C .

Из-за наличия высших гармоник ток в нулевом проводнике может превышать ток в фазном проводнике более чем в 1,5 раза. Этот ток вызывает дополнительный нагрев проводников и тепловой износ их изоляции, что приводит к снижению надежности осветительных электрических сетей.

Газоразрядные лампы из-за нелинейности вольтамперной характеристики дугового разряда и наличия в комплекте светового прибора ПРА являются источниками высших гармоник тока и напряжения 3, 5 и 7-го порядка. Для люминесцентных ламп низкого давления с индуктивным балластным сопротивлением относительное значение токов третьей и пятой гармоник соответственно составля-

ет 4 и 0,6% от тока первой (основной) гармоники, а с индуктивно-емкостным балластным сопротивлением – 16...21 и 0,9 ... 3%.

Для ламп типа ДРЛ без компенсации реактивной мощности этот показатель составляет 6,2...9% для третьей гармоники и 0,9...3% - для пятой. Компенсация реактивной мощности увеличивает токи высших гармоник ламп типа ДРЛ: третьей гармоники до 18% , а пятой – до 5,8 ...7,2% [37].

Величина тока k -й высшей гармоники газоразрядной лампы приближенно определяется по следующей формуле [34]:

$$I_k = \frac{0,2S_n}{U_n \cdot k^2} ,$$

где S_n - полная мощность газоразрядной лампы, В·А;

U_n - номинальное напряжение лампы, В.

Действующее значение тока в электрической цепи с учетом высших гармонических составляющих приближенно можно определить по выражению

$$I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \alpha^2} , \quad (4.3)$$

I_1 - действующее значение основной (первой гармоники тока), А;

α - суммарный коэффициент гармонического искажения тока, о.е.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока α представляет собой отношение суммарного действующего значения всех высших гармоник к действующему значению тока основной гармоники:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} ,$$

где I_k - действующее значение тока k -й гармоники. ГОСТ13109-97 ограничивает диапазон учитываемых гармоник 40-й (2кГц), так как амплитуды гармоник более высокого порядка незначительны.

Уточнение действующего значения тока с учетом высших гармонических составляющих по формуле (4.3) способствует повышению эффективности осветительных установок с газоразрядными лампами.

На напряжение в электрических сетях существенное влияние оказывают высшие гармонические составляющие тока и напряжения. Вопросы влияния высших гармоник в осветительных сетях с газоразрядными лампами достаточно сложны и подлежат дальнейшему более глубокому исследованию с целью разработки инженерных методик расчета высших гармоник, которые могли бы применяться при проектировании осветительных установок. Отметим, что в [20] приводятся математические выражения, позволяющие определить потери напряжения в электрической сети с учетом высших гармоник. Однако они сложны для практического применения.

В процессе проектирования осветительных установок важно знать, в каких случаях расчеты можно вести по общепринятым методикам, не прибегая к более точным формулам для определения потерь напряжения. В связи с этим в таблице 4.10 приведены предельные длины кабельных и воздушных линий напряжением до 1 кВ, при которых ошибка при расчете потерь напряжения по обычным формулам без учета высших гармоник не превышает 10 % [20].

Таблица 4.10

Предельные длины линий напряжением до 1 кВ, для которых расчеты потерь напряжения могут производиться без учета высших гармоник тока

| Сечение проводника, мм ² | Ток нагрузки, А | Предельная длина кабельной линии, м | | Ток нагрузки, А | Предельная длина воздушной линии, м | |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|
| | | cos $\varphi = 0,9$ | cos $\varphi = 0,5$ | | cos $\varphi = 0,9$ | cos $\varphi = 0,5$ |
| 4 | 38 | 116 | 76 | - | - | - |
| 6 | 46 | 143 | 98 | - | - | - |
| 10 | 65 | 170 | 116 | - | - | - |
| 16 | 90 | 198 | 140 | 105 | 154 | 139 |
| 25 | 115 | 250 | 180 | 135 | 157 | 181 |
| 35 | 135 | 286 | 225 | 170 | 136 | 197 |
| 50 | 165 | 321 | 277 | 215 | 106 | 199 |
| 70 | 200 | 342 | 332 | 265 | 78 | 183 |
| 95 | 240 | 340 | 386 | 320 | 57 | 155 |
| 120 | 270 | 327 | 434 | 375 | 43 | 151 |

При токах нагрузки линии I_p , отличающихся от максимально допустимых $I_{доп}$, приведенные в таблице 4.2 предельные длины должны быть пересчитаны в отношении $I_{доп} / I_p$.

4.6. Влияние высших гармонических составляющих тока и напряжения на эффективность работы электрических сетей

Высшие гармоники тока и напряжения оказывают влияние на качество напряжения, режимные показатели, а также надежность работы электрических сетей осветительных установок.

В электроустановках напряжением 0,4 кВ нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения равно 8%, а предельно допустимое – 12 %.

Допустимые уровни высших гармоник ограничиваются действующими стандартами. Требования стандарта *IEC -1000-2-2* Международной электротехнической комиссии (МЭК) приведены в таблице 4.11. В ней указаны предельно допустимые значения уровней высших гармонических составляющих напряжения в точках подключения электроприемников к сети. В случае их превышения электроснабжающая организация вправе потребовать у потребителей электроэнергии снизить уровни высших гармоник путем применения сглаживающих фильтров или других средств.

Высшие нечетные гармоники тока, кратные трем, вызывают падение напряжения, как в нейтральном, так и в фазных проводниках. Это приводит к искажению формы напряжения в электрической сети, а значит и напряжения на зажимах всех электроприемников, подключенных к этой сети.

В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием электромагнитных полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей токами высших гармоник, в электроустановках наблюдаются негативные эффекты, которые оказывают мгновенное и длительное воздействия на питающие, распределительные и групповые сети, электрооборудование и другие технические устройства, находящиеся в зоне возникновения электромагнитных помех.

Мгновенное воздействие высших гармоник тока и напряжения в осветительных установках проявляется в следующем [20,34,36,37]:

- искажение синусоиды питающего напряжения;
- дополнительные потери напряжения в электрических сетях;

Таблица 4.11

Допустимые уровни высших гармоник напряжения
согласно стандарту *IEC-1000-2-2*

| Номер гармоники | Частота гармоники | Допустимый уровень |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| 2 | 100 Гц | 2,0 % |
| 3 | 150 Гц | 5,0 % |
| 4 | 200 Гц | 1,0 % |
| 5 | 250 Гц | 6,0 % |
| 6 | 300 Гц | 0,5 % |

| | | |
|----|--------|-------|
| 7 | 350 Гц | 5,0 % |
| 8 | 400 Гц | 0,5 % |
| 9 | 450 Гц | 1,5 % |
| 10 | 500 Гц | 0,5 % |
| 11 | 550 Гц | 3,5 % |
| 12 | 600 Гц | 0,2 % |
| 13 | 650 Гц | 3,0 % |
| 14 | 700 Гц | 0,2 % |
| 15 | 750 Гц | 0,3 % |
| 16 | 800 Гц | 0,2 % |
| 17 | 850 Гц | 2,0 % |
| 18 | 900 Гц | 0,2 % |
| 19 | 950 Гц | 1,5 % |

- появление в трехфазных сетях нечетных гармоник кратных трем, которые обуславливают протекание по нулевому рабочему проводнику тока даже в случае симметричной нагрузки фаз;
- появление резонансных режимов тока и напряжения на частотах высших гармоник, которые сопровождаются резким возрастанием тока и напряжения на отдельных участках сети, что может повлечь за собой перегорание ламп и отказы в работе осветительных установок;
- наведение электромагнитным путем напряжения в телекоммуникационных и управляющих цепях;
- сбои в работе и выход из строя цифровых технических систем (микропроцессоров, компьютеров, систем автоматического управления и коммуникаций и др.), применяемых в осветительных установках;
- срабатывание аппаратов защиты в электроустановках напряжением до 1 кВ (предохранителей и автоматических выключателей) вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств.

Длительное воздействие высших гармонических составляющих вызывает такие негативные последствия [20,34,36,37]:

- дополнительный нагрев токами высших гармоник трансформаторов, проводов, кабелей, осветительных шинопроводов, ПРА, конденсаторов и других элементов систем электрического освещения;

- превышение длительно допустимой температуры нагрева нулевых рабочих проводников электрических сетей напряжением до 1 кВ, которое может вызвать их повреждение;
- ускоренный тепловой износ изоляции проводов и кабелей;
- увеличение диэлектрических потерь в изоляции кабелей и статических конденсаторах;
- сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции;
- дополнительные потери активной и реактивной мощности, а также электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ и питающих трансформаторах;
- увеличение погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, которое приводит к неполному учету электроэнергии;
- снижение коэффициента мощности нагрузки осветительных установок.

Как следует из выше изложенного, высшие гармоники тока и напряжения могут создать серьезные проблемы в электрических сетях напряжением до 1 кВ. Они отрицательно влияют на работу электрических сетей систем электрического освещения, снижая их надежность и эффективность. Поэтому в случае нелинейной нагрузки, подключенной на фазное напряжение, которой, например, является комплект «электромагнитный ПРА - газоразрядная лампа», необходимо учитывать влияние каждой гармоники. Специалисты, занимающиеся созданием световых приборов, проектированием и эксплуатацией осветительных установок, должны глубоко понимать процессы возникновения высших гармонических составляющих тока и напряжения, знать способы их подавления или снижения.

5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ

5.1. Схемы подключения светодиодов

Для стабильной работы светодиода как светового прибора необходима соответствующая электрическая схема, обеспечивающая требуемые значения подаваемого напряжения и силы протекающего через него тока. Например, для работы красного светодиода необходимо напряжение всего 2 В, а синего и зеленого – 3-4 В [38]. Сила тока, протекающего через светодиод, должна находиться в диапазоне от 20 до 150 мА. При больших значениях тока светодиод перегорает. Следует отметить такую особенность действия $p-n$ – перехода: повышение напряжения всего на 0,1 В увеличивает силу тока в несколько раз. Поэтому для нормального функционирования светодиодов необходим стабилизатор тока. В простейшем случае применяется токоограничивающий резистор R , сопротивление которого определяется исходя из значений напряжения и тока.

Принципиальная схема питания светодиода от источника постоянного тока приведена на рисунке 5.1 [5].

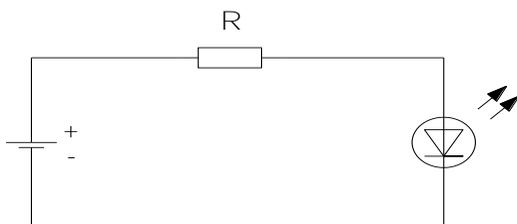


Рис. 5.1 Принципиальная схема питания светодиода от источника постоянного тока

Светодиоды можно питать и от источника переменного тока, как это показано на схеме, приведенной на рисунке 5.2 [5].

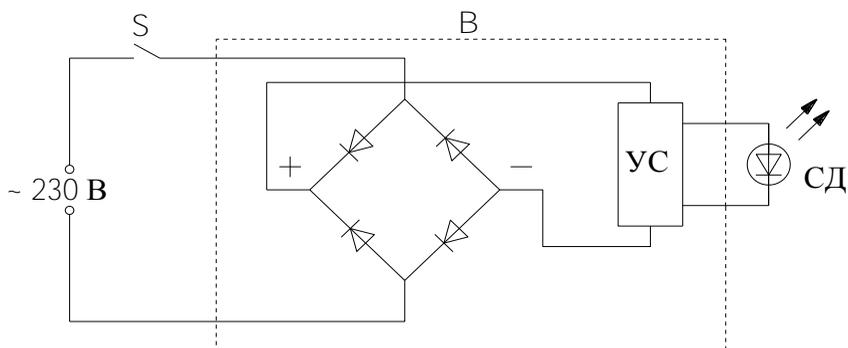


Рис. 5.2 Принципиальная схема питания светодиода от источника переменного тока:

S – выключатель; B – выпрямитель; $УС$ – устройство стабилизации работы светодиодов; $СД$ – светодиод.

Естественно, что для обеспечения возможности подключения светодиодов к электрической сети переменного тока напряжением 230 В должны быть применены соответствующие элементы для понижения напряжения до необходимого уровня.

Яркость светодиодов хорошо поддается регулированию. Для этой цели применяется так называемый метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который заключается в том, что на светодиод подается не постоянный, а импульсно-модулированный ток. При этом частота сигнала должна составлять от сотен до тысяч герц, а ширина импульсов и пауз между ними может изменяться. По мере старения светодиода происходит снижение его яркости и изменение цвета излучаемого им света. Однако в настоящее время нет стандартов, которые позволили бы выразить количественно изменение цвета светодиодов в процессе старения и сравнить его с другими источниками светового излучения [38].

5.2. Достоинства и недостатки светодиодных источников света

Светодиоды, обладая хорошими светотехническими характеристиками, являются безопасными, экологически чистыми, удобными

для применения, не требующими значительных затрат на эксплуатацию источниками света. В ближайшей перспективе они могут стать вполне конкурентоспособными по отношению не только к лампам накаливания, но и к газоразрядным лампам.

Единичные светодиоды применяются в системах визуального отображения информации, световой сигнализации, в маломощных подсветках и т.п. Для целей светодиодного освещения создаются специальные светодиодные сборки разного конструктивного исполнения, содержащие множество светодиодов и обеспечивающие требуемые функции и показатели освещения в установках архитектурной подсветки зданий и наружного освещения, информационных световых табло, устройствах праздничной иллюминации, в системах рабочего, аварийного и дежурного освещения и т.д.

Светодиоды обладают рядом очевидных преимуществ по сравнению с традиционными источниками света, такими, как:

1. **Высокая световая отдача.** В настоящее время выпускаются светодиоды со световой отдачей более 80 лм/Вт [39], в то время как у ламп накаливания этот показатель составляет до 20 лм/Вт, галогенных ламп – от 20 до 30 лм/Вт, а у газоразрядных ламп низкого давления (люминесцентных ламп) – около 80 – 100 лм/Вт [9]. В [8] отмечается, что при светоотдаче белых светодиодов 50 лм/Вт они могут эффективно заменять лампы накаливания, в том числе галогенные.

2. **Питание светодиодов осуществляется на постоянном токе и низком напряжении.** Питание светодиодов от источника постоянного тока исключает потребление реактивной мощности. Низкое напряжение питания позволяет использовать светодиодные источники света для освещения мест опасных в отношении поражения электрическим током (например, ванных комнат и сырых помещений), а также труднодоступных мест, где технически сложно или экономически невыгодно прокладывать электрические сети обычных осветительных установок. Кроме того, невысокое напряжение питания позволяет создавать автономные светодиодные осветительные устройства на основе аккумуляторных или солнечных батарей.

3. **Отсутствие ультрафиолетового и инфракрасного излучения.** Как известно, избыточное ультрафиолетовое излучение оказывает неблагоприятное влияние на живые объекты. В частности, у

человека оно вызывает органические нарушения в сетчатке глаз, что приводит к ухудшению и потере зрительного восприятия. Инфракрасное излучение световых приборов приводит к нагреву освещаемой поверхности, что во многих случаях нежелательно.

4. **Длительный срок службы.** Для современных светодиодов при температуре активной области 25°C он составляет от 50 000 до 100 000 часов. Самые долговечные газоразрядные натриевые лампы типа ДНаТ имеют среднюю продолжительность горения около 20 000 ч. Следует отметить, что срок службы светодиодного изделия определяется надежностью его вспомогательных элементов: блока питания, элементов вторичной оптики, корпусных изделий, некачественное изготовление которых способно снизить надежность работы световых приборов. В тоже время многие производители светотехнической продукции дают гарантию не на светодиодное устройство в целом, а только на его светодиодную часть.

5. **Виброустойчивость.** В отличие от ламп накаливания и люминесцентных ламп светодиодные источники света обладают достаточно высокой механической прочностью и устойчивостью к вибрациям, так как не имеют стеклянных колб и нитей накаливания. Благодаря этому они надежны в работе и не требуют существенных затрат в процессе эксплуатации.

6. **Хорошие светотехнические характеристики.** Светодиоды являются уникальными источниками света с широким диапазоном цветовых оттенков, которые можно динамически изменять без дополнительных светофильтров. Светодиоды белого цвета имеют цветовую температуру $T_c = 6\,000 - 8\,500\text{ K}$ и индекс цветопередачи $Ra > 80$, в то время, как наилучшие значения цветовой температуры у новейших люминесцентных ламп низкого давления не превышает 6500 K [5]. Это означает, что такие светодиоды дают белый дневной свет ($T_c > 5\,000\text{ K}$) с удовлетворительной цветопередачей. Спектр излучения светодиодов близок к монохроматическому. Светодиоды излучают свет в узкой части спектра, их цвет чист, что особенно ценят дизайнеры. Излучение светодиодов воспринимается человеческим глазом на большом расстоянии, что весьма важно при создании устройств визуального отображения информации, сигнализации, навигационных систем и т.п. Например, бакены со светодиодными источниками света видны на расстоянии до 18 км.

7. **Направленность света.** Обычные электрические лампы излучают свет равномерно во все стороны, а светодиоды - только в одном преимущественном направлении. Это позволяет значительно снизить потери светового потока в оптических системах световых приборов.

8. **Безынерционность.** Это свойство делает светодиоды незаменимыми источниками света в тех случаях, когда требуется высокое быстродействие.

9. **Полная экологическая безопасность.** Светодиоды не содержат компонентов, оказывающих вредного воздействия на окружающую среду. Следовательно, они не требуют специальных условий по утилизации.

Основным недостатком светодиодных осветительных устройств, препятствующим их широкому внедрению в осветительных установках, является высокая стоимость таких источников света, обусловленная сложностью технологии их изготовления. Кроме того, существует ряд технологических особенностей работы светодиодов, которые также требуют принятия соответствующих технических решений при создании световых приборов:

1. Необходимо решать проблему отвода от светодиодов избыточной теплоты. При перегреве светодиодов снижается их световой поток, меняется цвет излучения, резко сокращается срок службы. Для каждого типа светодиодов существует предельная температура области *p-n*-перехода. В частности, для светодиодов типа *Luxion I* она составляет 130 °С. Тепловая проблема решается уже при конструировании самих светодиодов. Но и при разработке светильников также необходимо обеспечивать оптимальный тепловой режим светодиодов.

2. Следует создавать так называемое вторичное оптическое устройство, нужным образом перераспределяющее световой поток светодиодов.

3. Поскольку единичные светодиоды имеют невысокий световой поток, то для получения требуемых светотехнических характеристик светового прибора необходима интеграция в одной конструкции нескольких (до нескольких десятков) светодиодов. При этом необходимо обеспечивать их соответствие требованиям электро- и пожаробезопасности, защиты от проникновения посторонних предметов, пыли и влаги, удобству монтажа и обслуживания.

В процессе эксплуатации яркость свечения светодиодов постепенно снижается. Это негативное явление называется деградацией светодиодов. Ее характерным параметром считается интервал времени, по истечении которого световой поток светодиодного источника света уменьшается до 50 % от первоначального значения. Светодиодные осветительные устройства деградируют неодинаково в зависимости от температуры активной области светодиодов, которая определяется тепловым дизайном как непосредственно светодиодов, так и светодиодного светильника. Чем выше температура активной области, тем быстрее снижает яркость свечения светодиодный кристалл. Поэтому в зонах с высокой температурой светодиоды быстро теряют свои первоначальные характеристики и преждевременно выходят из строя. Например, при температуре 60-80°C они будут работать около года [9]. Грамотный тепловой дизайн светодиодных изделий увеличивает их срок службы.

Светодиодные источники света подключаются к электрической сети переменного тока напряжением 230 В через преобразовательные устройства (рис. 5.2). В связи с этим возникает ряд вопросов, связанных с их влиянием на коэффициент мощности нагрузки сети, генерированием высших гармоник тока и напряжения и др.

К сожалению, многими производителями светодиодных осветительных устройств зачастую не учитываются гигиенические аспекты влияния светодиодного освещения на зрение человека. В частности на промышленных предприятиях иногда имели место случаи негативного восприятия излучения светодиодных световых приборов, главным образом, из-за производимого ими слепящего эффекта. Отчасти данная проблема обусловлена недостатками конструкции светодиодных изделий, а также их неграмотным применением. Следует учитывать, что светодиод представляет собой точечный узкоспектральный источник света. Поэтому при средней энергетической яркости свыше $1 \text{ Вт}/(\text{ср}\cdot\text{см}^2)$ его излучение потенциально опасно для глаз и кожи человека, особенно при использовании собирающих линз и линзовых систем (согласно европейскому стандарту IEC 60825-1). Для устранения слепящего эффекта необходимо перейти от точечного источника света к протяженному, например, посредством светорассеивающих пленок и других элементов вторичной оптики. Производители светодиодных осветительных уст-

ройств должны строго соблюдать существующие требования нормативно-технической документации.

Отметим, что в малых дозах светодиодное освещение может оказывать терапевтическое действие на человека. В мире известно и успешно развивается такое направление медицины, как цветотерапия. Путем ее использования корректируют функцию макулы сетчатки глаза, улучшают зрительные функции, корректируют функциональные системы организма: эндокринную, вегетативную нервную систему, центральную нервную систему и др.

5.3. Возможные области применения светодиодных изделий

Разработчиками светодиодных изделий активно ведется поиск наилучших технико-экономических решений по применению светодиодных источников света в искусственном освещении помещений и в наружных осветительных установках. Рассмотрим возможные области применения светодиодных изделий.

1. *Осветительные установки общедомовых помещений жилых и общественных зданий.* Наиболее перспективным (с учетом значительной стоимости этих устройств) является применение светодиодных источников света для нужд объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

В частности, для освещения предквартирных тамбуров и лестничных площадок выпускаются светильники мощностью от 5 до 25 Вт со световым потоком 250 – 1000 лм. Это сопоставимо со световыми потоками лампы накаливания мощностью 75 Вт, люминесцентной лампы низкого давления мощностью 18 Вт, а также компактной люминесцентной лампы мощностью 16 Вт.

Учитывая, что срок службы светодиодов значительно больше, чем у других источников света, потребляемая мощность ниже, а также ввиду отсутствия в своем составе ртути (светодиоды не требуют специальной утилизации), такие светильники могут эффективно заменить существующие источники света, применяемые сейчас для освещения общедомовых помещений в ЖКХ.

2. *Наружное освещение.* Для освещения городских улиц, муниципальных дорог, а также общественных мест и дворовых территорий выпускаются светодиодные уличные светильники. Использование светодиодных светильников позволяет экономить средства по

эксплуатации городского хозяйства за счет снижения затрат на электроэнергию и техобслуживание. Кроме того улучшается экологическая обстановка в городе и регионе, поскольку в отличие от ртутных ламп, светодиодные светильники не содержат вредных компонентов. Дополнительный экономический эффект достигается благодаря использованию автономных систем уличного освещения. В этом случае экономия электроэнергии может достигать 90%. Однако такие системы еще не нашли широкого распространения.

3. **Прямая замена ламп накаливания, галогенных ламп и люминесцентных ламп со стандартным цоколем типа E.** В применяемом для этой цели светодиодном устройстве в цоколе размещается преобразователь, а в колбе – светодиоды. В светодиодных устройствах, являющихся аналогами галогенных ламп, используется от 19 до 33, а ламп накаливания – от 32 до 132 светодиодов со встроенными устройствами стабилизации тока. Стоимость таких сборок составляет 12–30 у.е. и 12–150 у.е. соответственно. Следует учитывать, что светодиодная лампа мощностью 1–1,5 Вт обычно дает световой поток примерно как лампа накаливания мощностью 10–20 Вт. В тоже время отметим, что имеются и более эффективные светодиодные лампы.

Разработаны и предлагаются на рынке светотехнической продукции светильники, предназначенные для прямой замены светильников с люминесцентными лампами низкого давления мощностью 36 и 58 Вт, применяемых в осветительных установках офисных, торговых и других помещений. Светильники данного типа обеспечивают световые потоки от 2200 до 4800 лм при потребляемой мощности 28 – 48 Вт.

4. **Рекламные установки.** При помощи единичных светодиодов можно создавать светящиеся буквы, информационные табло, вывески, указатели и т. д. Цветодинамические рекламные установки изготавливаются с использованием полноцветных RGB-модулей, которые могут быть реализованы на основе трех отдельных светодиодов красного, зеленого и синего цветов свечения, либо с использованием трехцветных светодиодов, выполненных на базе кристаллов трех цветов. Стоимость таких модулей составляет от 1 у.е. и выше. Они управляются специальным контроллером, с помощью которого создается свет со всеми оттенками спектра радуги. Существуют контроллеры с функцией плавного изменения яркости света

(диммеры) и цвета (колорчейнджеры), позволяющие эффективно использовать светодиоды в системах декоративного освещения.

5. Светосигнальные устройства и системы визуального отображения информации. Видеоэкраны.

Основными элементами систем визуального отображения информации являются светодиодные кластеры, матрицы, и цифровые индикаторы.

Светодиодные кластеры представляют собой светодиодные сборки, заключенные в общий влагозащищенный и светонепроницаемый корпус. Один кластер соответствует одному пикселю изображения, а для повышения интенсивности свечения каждого цвета в кластере применяются несколько светодиодов. Например, в кластере может быть установлено 4 красных, 4 зелёных и 3 синих сверхярких светодиода.

Светодиодные матрицы – это светодиодные сборки, объединенные в общий корпус, но, в отличие от кластеров, не являющиеся одним пикселем. Различают светодиодные матрицы с общим катодом и с общим анодом. Светодиодные матрицы изготавливаются как монохромными, так и полноцветными (*RGB*).

Светодиодные цифровые индикаторы в зависимости от условий эксплуатации, главным образом от уровня освещенности на поверхности индикатора и климатических условий применения разделяются на две группы. К первой группе относятся индикаторы, в которых графический образ символа отображается с помощью однородно светящихся сегментов, ко второй – индикаторы, сегменты которых выполнены на основе совокупности множества отдельно светящихся светодиодов.

6. Декоративная и архитектурная подсветка.

Для декоративной подсветки применяются световые цепочки, гирлянды, шнуры, а также светящиеся сети для праздничных иллюминаций.

Декоративная подсветка ступенек лестниц может быть реализована с использованием так называемых светодиодных линеек, содержащих от 4 до 24 светодиодов и снабженных общей контактной группой [9]. Они имеют степень защиты *IP65*, что позволяет устанавливать их вне помещений. Возможной областью применения таких светодиодных линеек является эвакуационное освещение, требующее освещенности всего 0,5 лк на уровне пола в здании и 0,2

лк вне здания. Светящиеся плинтусы обеспечивают безопасность движения людей и транспортных средств, одновременно выполняя функции декоративного освещения в зданиях, а также на улицах и дорогах. Для этого разработаны гибкие ленточные светодиодные модули со степенью защиты $IP\ 67$, содержащие 36 светодиодов на погонный метр [40]. Для архитектурной подсветки зданий и сооружений применяются светодиодные прожекторы.

На промышленных предприятиях светодиодные источники света могут применяться в разнообразных светосигнальных устройствах, для локального освещения камер распределительных устройств и другого электрооборудования, для рабочего освещения вспомогательных помещений, а также в местах с неблагоприятными условиями окружающей среды, за исключением жарких, в системах аварийного, дежурного и наружного освещения.

По мере повышения световой отдачи и снижения себестоимости производства светодиоды будут находить все более широкое применение в качестве источников света. Использование светодиодных световых приборов вместо традиционных источников света в перспективе позволит существенно снизить затраты на электрическое освещение зданий и наружных территорий. Основные сравнительные характеристики светодиодов, люминесцентных ламп низкого давления и ламп накаливания приведены в таблице 5.1.[38].

Таблица 5.1

Сравнительные характеристики источников света

| Параметр сравнения | Светодиоды | Люминесцентные лампы | Лампы накаливания |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|
| Компактность | Компактные | Габаритные, есть компактные | Компактные |
| Удароустойчивость | Устойчивые | Хрупкие | Хрупкие |
| Энергопотребление | 10% от потребления ЛН | Среднее | Высокое |

| | | | |
|---|---|--|-------------|
| Светоотдача | Средняя | Высокая (до 80лм/Вт) | Низкая |
| Возможность получения цветного света | Есть (16 млн. цветов) | Светофильтр | Светофильтр |
| Срок службы, ч | 100 000 | 10 000 | 1000 |
| Легкость в монтаже и обслуживании | Есть | Нет | Нет |
| Инерционность | Очень низкая | Средняя | Высокая |
| Зависимость срока службы от количества включений/выключений | Нет | Высокая | Высокая |
| Температура эксплуатации | -30 ⁰ С - +70 ⁰ С | +5 ⁰ С - +50 ⁰ С | - |
| Стоимость | Высокая | Средняя | Низкая |

5.4. Эффективность применения светодиодных светильников для освещения производственного помещения

Эффективность использования световых приборов на основе светодиодов исследована на примере освещения механического цеха промышленного предприятия с нормальными условиями окружающей среды (рисунки 5.3 и 5.4). Длина цеха $A=42$ м, ширина $B=18$ м, строительная высота – 8,4 м. Расчетная высота от условной рабочей поверхности до светильника $H_p=7$ м. Цех имеет побеленные стены и чистый бетонный потолок. В цехе имеется естественное освещение. Цех работает в три смены пять дней в неделю. Питание цеха осуществляется от трансформаторной подстанции с одним трансформатором типа ТМГ мощностью 630 кВ·А (коэффициент загрузки 0,88; коэффициент мощности $\cos\phi = 0,79$), которая расположена на расстоянии 65 м от рассматриваемого цеха.

Рассмотрены два варианта освещения этого помещения:

- 1) светильниками с газоразрядными лампами типа ДРЛ;
- 2) светильниками со встроенной светодиодной матрицей.

В первом случае для освещения принят светильник серии РСП18 дуговой ртутной люминесцентной лампой типа ДРЛ. Данный светильник, предназначенный для общего освещения производственных помещений, имеет кривую силы света (КСС) типа Г, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,5$, КПД 70-75%. Светильник комплектуется независимым ПРА.

Во втором варианте для освещения цеха применяются светильники, выполненные на основе светодиодной матрицы с КСС типа К. Светильники предназначены для общего освещения производственных помещений, складов, площадей, улиц. Они могут использоваться также для декоративного освещения зданий. Напряжение питания светильника составляет 230 В, номинальная мощность 100 Вт, $\cos\varphi = 0,98$. Защитный светопропускающий элемент, выполненный из поликарбоната, термостоек, прочен, с высокой светопропускающей способностью. Защита светодиодного источника света от пыли и влаги достигается с помощью силиконового уплотнения, сохраняющего свою эластичность в течение длительного времени. Внутри корпуса светильника установлен отражатель, блок питания, светодиодные источники света и клеммные зажимы.

Для каждого варианта освещения цеха выполнены светотехнический и электрический расчеты осветительной сети, на основании которых произведена экономическая оценка эффективности использования каждого типа светильников.

При проектировании осветительных установок целью светотехнического расчета является определение числа и мощности источников света светильников, необходимых для обеспечения заданной освещенности. Число и месторасположение светильников намечают до расчета освещения, а в процессе расчета определяют необходимую мощность источника света.

В соответствии с [5,7] произведено размещение светильников (рисунки 5.3 и 5.4). При использовании газоразрядных ламп типа ДРЛ для освещения цеха требуется 21 светильник, а светодиодных источников света – 72. Далее методом коэффициента использования светового потока определяется расчетное значение светового потока одной лампы.

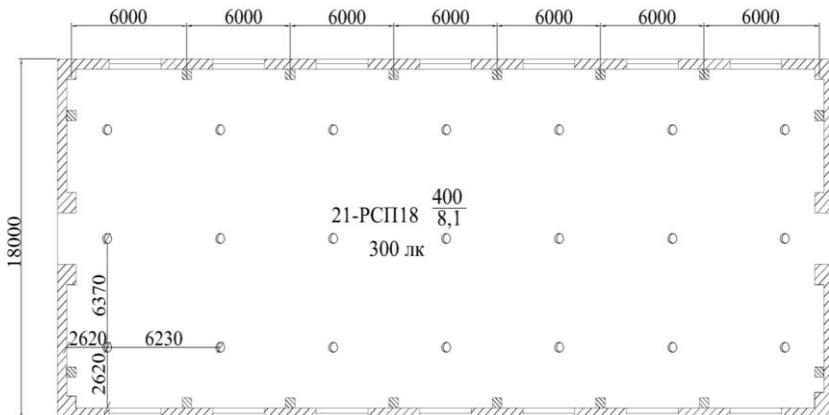


Рис. 5.3 Схема размещения светильников с лампами типа ДРЛ

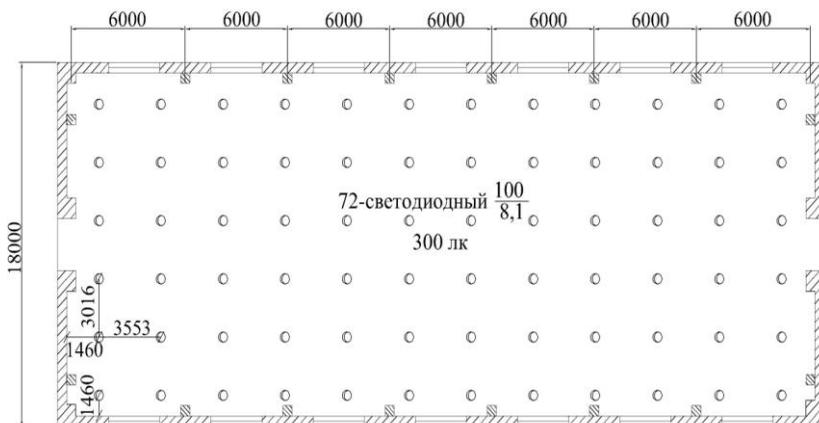


Рис. 5.4 Схема размещения светодиодных светильников

Расчетное значение светового потока одной лампы в каждом светильнике определяется по формуле

$$\Phi_{лр} = \frac{E_n \cdot K_z \cdot F \cdot Z}{N \cdot \eta_{oy}}$$

где E_H – нормируемое значение освещенности, лк;

K_3 – коэффициент запаса;

F – освещаемая площадь, м²;

η_{oy} – коэффициент использования светового потока осветительной установки, о. е.;

Z – отношение средней освещенности к минимальной.

При выполнении светотехнического расчета нормируемое значение освещенности цеха принималось равным 300 лк [4]. Для механического цеха коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности помещения в процессе эксплуатации световых приборов, равен 1,4. Коэффициент Z , характеризующий неравномерность освещенности, для газоразрядных источников света высокого давления принят 1,15.

Под коэффициентом использования светового потока понимают отношение светового потока, падающего на расчетную поверхность, к световому потоку источника света. Его значение принимается по справочной литературе [7] в зависимости от типа КСС светильника, коэффициентов отражения поверхностей помещения (потолка $\rho_{п}=0,5$, стен $\rho_{с}=0,5$, расчетной поверхности освещения $\rho_{р}=0,1$) и от индекса помещения

$$i_{п} = \frac{A \cdot B}{H_{р} \cdot (A + B)}.$$

По найденному значению $\Phi_{лр}$ выбирается лампа ближайшей стандартной мощности, значение светового потока которой $\Phi_{л}$ отличается от $\Phi_{лр}$ не более чем на $-10...+20\%$.

При освещении газоразрядными лампами принят светильник серии РСП18-400-01 с дуговой ртутной люминесцентной лампой типа ДРЛ мощностью 400 Вт. Световой поток лампы $\Phi_{л} = 24000$ лм.

Результаты светотехнического расчета для рассматриваемых вариантов освещения цеха представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Характеристики световых приборов

| Тип светильника в осветительной установке | Общее количество светильников, шт | Расчетный световой поток лампы, лм | Световой поток стандартной лампы, лм | Разница в световых потоках, % | Номинальная мощность лампы, Вт |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| РСП18 | 21 | 25040 | 24000 | -4,16 | 400 |
| светодиодный | 72 | 6131 | 6500 | 6,02 | 100 |

Результаты светотехнического расчета показывают, что при использовании для рабочего освещения светильников как с лампами типа ДРЛ, так и со светодиодами достигается требуемая освещенность механического цеха. При этом светодиодные светильники обеспечивают более высокий уровень освещенности помещения.

В результате электрического расчета осуществляется выбор сечений проводников по допустимому нагреву и допустимой потере напряжения, определяются потери напряжения при выбранных сечениях проводов и жил кабелей, а также уровни напряжения подводимого к зажимам наиболее удаленных световых приборов. Для этого первоначально производится расчет электрической нагрузки групповых линий и на вводе осветительного щитка цеха.

Расчетная осветительная нагрузка производственных и общественных зданий, а также наружного освещения определяется исходя из суммарной мощности ламп, полученной в результате светотехнического расчета. Установленная мощность находится суммированием номинальной мощности ламп стационарных осветительных приборов. В осветительных установках с разрядными лампами расчетная нагрузка определяется с учетом потерь мощности в ПРА.

Расчетная активная нагрузка, кВт, на вводе в здание или в начале питающей линии, вычисляется по формуле

$$P_p = K_c \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{ПРА}i} \cdot P_{\text{ном}i} \quad (5.1)$$

где K_c – коэффициент спроса осветительной нагрузки;

$K_{\text{ПРА}i}$ – коэффициент, учитывающий потери в пускорегулирующей аппаратуре i -й газоразрядной лампы;

$P_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность i -й лампы, кВт;

n – количество ламп, питающихся по линии (установленных в здании или помещении).

При расчете нагрузок линий, питающих светодиодные световые приборы, учитываются потери мощности в устройствах, обеспечивающих работу светодиодов, с помощью коэффициента K_y . Тогда

$$P_p = K_c \cdot \sum_{i=1}^n K_{yi} \cdot P_{\text{ном}i}$$

где $P_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность i -го светодиодного светильника, кВт;

n – количество светильников, питающихся по линии (установленных в здании или помещении).

При расчете электрической нагрузки линий принимались значения коэффициентов $K_{\text{ПРА}}$ и K_y равными 1,1, а $K_c = 1,0$.

Светильники с лампами типа ДРЛ обладают значительной пульсацией светового потока (около 65%). Поэтому для их питания с целью снижения пульсации до требуемых значений используется трехфазная пятипроводная линия. Светодиодные светильники таким недостатком не обладают и для их питания принимается однофазная трехпроводная линия.

Расчетный ток, А, для трехфазной пятипроводной линии определяется по выражению

$$I_p = \frac{P_{po} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\text{ном} \phi} \cdot \cos \varphi}$$

где $U_{номф}$ - номинальное фазное напряжение сети ($U_{номф} = 230В$);
 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности для используемых ламп.

Для однофазной трехпроводной линии освещения расчетный ток вычисляется по формуле

$$I_p = \frac{P_{po} \cdot 10^3}{U_{ном\ \phi} \cdot \cos \varphi}.$$

Результаты расчета электрических нагрузок осветительной сети при использовании светильников с лампами типа ДРЛ и со светодиодами представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Электрические нагрузки питающей и групповых линий

| Тип светильника в осветительной установке | Групповые линии | | Питающая линия | |
|---|-----------------|-----------|----------------|-----------|
| | P_p , кВт | I_p , А | P_p , кВт | I_p , А |
| РСП18 | 3,08 | 8,93 | 9,24 | 26,78 |
| светодиодный | 1,20 | 5,32 | 7,20 | 10,65 |

Сечение проводников линий освещения по допустимому нагреву выбирается по условию (2.4), а по допустимой потере напряжения – по следующей формуле:

$$F = M / (C \cdot \Delta U_{доп}), \quad (5.2)$$

где M – момент нагрузки линии, кВт·м;

C - расчетный коэффициент, величина которого принимается, исходя из номинального напряжения сети, системы сети, рода тока, материала проводников [5];

$\Delta U_{доп}$ - допустимое значение потери напряжения в линии осветительной сети, %.

Из двух сечений, найденных по допустимому нагреву и по допустимой потере напряжения, выбирается большее и округляется до

ближайшего большего значения стандартного сечения проводника. Сеть электрического освещения в обоих рассматриваемых вариантах выполняется кабелем с алюминиевыми жилами марки АВВГ, который прокладывается открыто. Конструктивно питающая линия выполняется на лотках, а групповые линии – на тросах. В таблице 5.4 приведены результаты выбора кабелей электрической сети при использовании для освещения цеха ламп типа ДРЛ и светодиодов.

Таблица 5.4

Кабели питающей и групповых линий осветительной сети цеха
промышленного предприятия

| Участок осветительной сети | Марка кабеля, количество и сечение жил при использовании светильников | |
|----------------------------|---|-------------------|
| | РСП 18 | светодиодных |
| питающая линия | АВВГ- 5×10-0,66 | АВВГ-5×6-0,66 |
| групповые линии | АВВГ - 5×2,5-0,66 | АВВГ - 3×2,5-0,66 |

Как следует из таблицы 5.4, групповые линии в обоих вариантах имеют минимально допустимое сечение жил из алюминия 2,5 мм². Однако из-за того, что при светодиодном освещении используется трехжильные кабели, а при освещении лампами типа ДРЛ – пятижильные, расход проводникового материала в случае применения светодиодных светильников сокращается на 40%, и, следовательно, снижается стоимость групповой сети. Питающая линия в обоих вариантах освещения цеха выполняется пятижильным кабелем. Но в сети со светодиодными светильниками сечение токопроводящих жил кабеля на одну ступень меньше, чем в сети с газоразрядными лампами. Это сокращает расход проводникового материала и стоимость питающей линии при освещении цеха светодиодными световыми приборами.

При технико-экономических расчетах, составлении электрического баланса, а также для оценки электропотребления, производственных, жилых и общественных зданий требуется определять расход электроэнергии на искусственное освещение расчетным путем.

В общем случае годовой расход электроэнергии на освещение определяется по следующей формуле:

$$W_{zo} = P_{po} \cdot T_{max o}, \quad (5.3)$$

где P_{po} – расчетная активная нагрузка освещения, кВт;
 $T_{max o}$ – годовое число часов использования максимума осветительной нагрузки.

Годовое число использования максимума осветительной нагрузки зависит от географической широты местности, вида освещения (рабочее, эвакуационное, безопасности и т.д.), наличия в помещении естественного освещения, числа и длительности рабочих смен. При расчетах расходов электроэнергии на освещение значения $T_{max o}$ принимаются по справочной литературе [5,7].

Учитывая то, что в цехе имеется естественное освещение, и светильники будут использоваться пять дней в неделю в течение трех рабочих смен, принимаем $T_{max o} = 4150$ ч [7,41]. Произведем расчет годового расхода электроэнергии для рассматриваемых вариантов освещения цеха промышленного предприятия. Полученные расчетным путем данные сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5
 Расход электроэнергии на электрическое освещение цеха

| Тип светильника в осветительной установке | Расчетная нагрузка, кВт | Годовой расход электроэнергии, кВт·ч |
|---|-------------------------|--------------------------------------|
| РСП18 | 9,24 | 38346 |
| светодиодный | 7,20 | 29880 |

Как видно из таблицы 5.5, для рассматриваемого помещения потребление электроэнергии светодиодными светильниками в 1,3 раза меньше, чем светильниками с лампами типа ДРЛ.

При выборе оптимального проектного решения наряду с разносторонней оценкой положительных и отрицательных факторов сравниваемых вариантов осуществляется их сопоставление путем выполнения технико-экономического расчета (ТЭР). Экономич-

ность проектируемых вариантов оценим двумя методами: приведенных затрат и чистого дисконтированного дохода [32, 42].

Метод приведенных затрат заключается в оценке приведенных затрат сравниваемых вариантов. Экономический смысл расчёта по приведенным затратам заключается в том, что наивыгоднейший вариант не соответствует техническому решению, обеспечивающему минимум годовых издержек эксплуатации или капитальных вложений. Обычно вариант с меньшими годовыми эксплуатационными расходами требует более крупных капитальных вложений, величина которых чаще всего ограничена. Поэтому нужно выбирать вариант, соответствующий оптимальному (при конкретных условиях работы проектируемого объекта) соотношению между текущими затратами и капитальными вложениями. Лучший из числа сравниваемых вариантов определяется по критерию минимума приведенных затрат.

Капитальные вложения в осветительную установку, учитываемые при определении приведенных затрат, складываются из стоимости световых приборов, их монтажа и стоимости одного комплекта ламп. При проведении комплексных ТЭР учитывается также стоимость приобретения и монтажа всех элементов электротехнической части. С учетом этого капитальные затраты (в рублях) определяются по выражению [32]

$$K = N \cdot (A \cdot n + B + M + 0,001 \cdot \alpha \cdot P \cdot C \cdot n) + C_{\text{пит.каб.}} \cdot l_{\text{пит.каб.}} + C_{\text{гр.каб.}} \cdot l_{\text{гр.каб.}} \quad (5.4)$$

где N – количество световых приборов, используемых для освещения рассматриваемого производственного цеха;

A – стоимость одной лампы, руб.;

n – количество ламп в световом приборе;

B – стоимость одного светового прибора, руб.;

M – средняя стоимость монтажа одного светового прибора, руб.;

α – коэффициент, учитывающий потери энергии в ПРА и в сети (потери в сети принимаются равными 3%);

P – номинальная мощность одной лампы, Вт;

C – стоимость монтажа электротехнической части осветительной установки на 1кВт установленной мощности ламп и потерь в ПРА, руб./кВт;

$C_{\text{пит.каб}}$ – стоимость 1 м длины питающего кабеля, руб./м;

$l_{\text{пит.каб.}}$ – длина питающего кабеля, м;

$C_{\text{гр.каб.}}$ – стоимость 1 м длины группового кабеля, руб./м;

$l_{\text{гр.каб.}}$ – длина группового кабеля, м.

Годовые эксплуатационные расходы, учитываемые при определении приведенных затрат, включают в себя оплату электроэнергии, затрачиваемую на освещение в течение года, стоимость заменяемых за год ламп, расходы на чистку световых приборов и амортизационные отчисления, принимаемые в размере 10% капитальных вложений. Эксплуатационные расходы, выраженные в рублях, рассчитываются по следующей формуле [32]:

$$\Xi = N \cdot \{ T_{\text{мах0}} (A + a) \cdot n / \tau + [a \cdot P \cdot T_{\text{мах0}} \cdot q \cdot n + 100 (B + M + C_{\text{пит.каб.}} \cdot l_{\text{пит.каб.}} + C_{\text{гр.каб.}} \cdot l_{\text{гр.каб.}}) + 0,1 \alpha \cdot P \cdot C \cdot n + 1000 m \cdot B] / 1000 \}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{мах0}}$ – число часов использования максимума осветительной нагрузки в год, ч;

a – стоимость работ по замене одной лампы, руб.;

τ – номинальный срок службы лампы, ч;

q – существующий тариф на электроэнергию для промышленных потребителей, руб./кВт·ч;

m – число чисток светового прибора в год;

B – стоимость одной чистки одного светового прибора, руб.

Полные приведенные затраты определяются с учетом произведенных выше расчетов по выражению:

$$З = 0,15 K + \Xi$$

При технико-экономическом сравнении вариантов стоимостные показатели должны исчисляться в единых ценах. В большинстве случаев при проектировании электроустановок целесообразно применять нормативные материалы, т.е. укрупненные показатели, приведенные в разнообразных справочниках. Укрупненные показатели должны корректироваться с помощью переводного коэффициента, учитывающего изменение цен за период, прошедший с момента их опубликования.

Для вариантов освещения цеха промышленного предприятия с применением световых приборов с газоразрядными лампами и светодиодами произведен технико-экономический расчет по приведенным затратам, результаты которого представлены в таблице 5.6.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что по капитальным затратам вариант с использованием светодиодных светильников оказался в 24 раза дороже варианта с использованием светильников с лампами типа ДРЛ. Это в первую очередь связано с высокой стоимостью светодиодных светильников. В то же время затраты на эксплуатацию светодиодных светильников примерно в 1,3 раза ниже, что является следствием их меньшего потребления электроэнергии.

Таблица 5.6

Основные технико-экономические показатели
осветительной установки цеха

| Тип светильника в светительной установке | Мощность лампы, Вт | Число светильников, шт | Стоимость светильника, руб. | Капвложения, млн.руб. | Срок службы лампы, ч | Годовые издержки эксплуатации, млн.руб. | Приведенные затраты, млн.руб. |
|--|--------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|---|-------------------------------|
| РСП 18 | 400 | 21 | 120000 | 4,56 | 12000 | 4980 | 4981 |
| светодиодный | 100 | 72 | 450000 | 109,60 | 100000 | 3748 | 3764 |

В итоге приведенные затраты при реализации проекта с использованием светодиодных светильников оказались в 1,3 раз меньше, чем приведенные затраты проекта с использованием светильников марки РСП18, т.е. проект с использованием светодиодных светильников оказался более выгодным, чем проект с использованием светильников с лампами типа ДРЛ.

При выполнении технико-экономических расчетов методом чистого дисконтированного дохода (ЧДД) оценка эффективности инвестиций базируется на сопоставлении ожидаемого чистого дохода от реализации проекта и инвестированного в проект капитала. В основе метода лежит вычисление чистого потока денежной на-

личности, определяемого как разность между чистым доходом по проекту и суммой общих инвестиционных затрат и платы за кредиты (займы), связанной с осуществлением капитальных затрат по проекту.

На основании чистого потока наличности рассчитывается основной показатель оценки эффективности инвестиций – чистый дисконтированный доход. ЧДД характеризует интегральный эффект от реализации проекта и определяется как величина, полученная дисконтированием (при постоянной ставке процента отдельно для каждого года) разницы между годовыми оттоками и притоками реальных денег, накапливаемых в течение горизонта (времени) расчета проекта [42]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^{T_{\text{гор}}} (R_t - I_t) \cdot (1 + E^{-t}) - K, \quad (5.6)$$

где R_t – результаты (приток реальных денег), достигаемые на шаге t (в нашем случае на участке всего расчетного периода результаты будут равны 0);

I_t – текущие издержки эксплуатации без учета амортизационных отчислений;

E – норма дисконтирования с учетом инфляции ($E = 0,15$);

K – единовременные капитальные вложения (первоначальные капитальные вложения при строительстве объекта);

$T_{\text{гор}}$ – горизонт расчета, равный номеру шага, на котором производится ликвидация объекта (срок службы объекта).

Так как ЧДД показывает абсолютную величину чистого дохода, приведенную к началу реализации проекта, то этот показатель должен иметь положительное значение, иначе инвестиционный проект нельзя рассматривать как эффективный. Но учитывая то, что проекты освещения не приносят реального дохода, то при сравнении более эффективным окажется проект с большим значением ЧДД.

Выполним сравнение вариантов освещения цеха лампами типа ДРЛ и светодиодами, принимая $T_{\text{гор}} = 10$ лет. Полученные результаты приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7

Значения ЧДД осветительной установки цеха

| Тип светильника в осветительной установке | Мощность лампы, Вт | Число светильников, шт | Горизонт расчета, лет | Срок службы лампы, ч | ЧДД млн. руб. |
|---|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|---------------|
| РСП18 | 400 | 21 | 10 | 12000 | -25000 |
| светодиодный | 100 | 72 | 10 | 100000 | -18920 |

Из таблицы 5.7 видно, что у второго проекта (с использованием светодиодных светильников) значение ЧДД больше, следовательно, он является более выгодным и предпочтительным в использовании.

5.5. Эффективность применения светодиодных светильников в системе жилищно-коммунального хозяйства

Эффективность применения световых приборов на основе светодиодов рассмотрим на примере типового проекта современного шестнадцатизэтажного двухподъездного жилого дома, из состава которого выделены общедомовые помещения и незадымляемые лестничные клетки. Питание жилого дома осуществляется от двухтрансформаторной подстанции, расположенной на расстоянии 50м. Подстанция укомплектована трансформаторами типа ТМГ мощностью 630 кВ·А. На рисунке 5.5 для одного этажа подъезда здания показаны планы освещаемых объектов, места размещения световых приборов и схема их питания.

Произведем светотехнический и электрический расчеты осветительных установок рассматриваемых объектов.

Светотехнический расчет выполнялся по двум вариантам [43]:

1) с применением светильников марки ЛБО22-18-501 с компактными люминесцентными лампами (КЛЛ) с номинальной мощностью 18Вт;

2) с использованием светильника марки ДПО-10-101 со светодиодной матрицей номинальной мощностью 10 Вт.

Приведем сравнительные характеристики принятых для освещения светильников.

Светильник типа ЛБО22-18-501УХЛ4 [44] предназначен для освещения лестничных клеток и холлов жилых домов, подвальных и прочих вспомогательных помещений. Он комплектуется электронным пускорегулирующим аппаратом и рассчитан на работу с КЛЛ. Данный светильник изготавливается в антивандальном исполнении, т.е. рассеиватель изготовлен из светотехнического поликарбоната и доступ внутрь светильника обеспечивается только с помощью специального ключа. Световой прибор соответствует II классу защиты от поражения электрическим током, степень защиты от воздействия окружающей среды – $IP54$, его КПД составляет не менее 65%, а $\cos \varphi$ - не менее 0,98. Габаритные размеры светильника: длина 368 мм, ширина–142 мм, высота – 60 мм, масса – 1,5 кг.

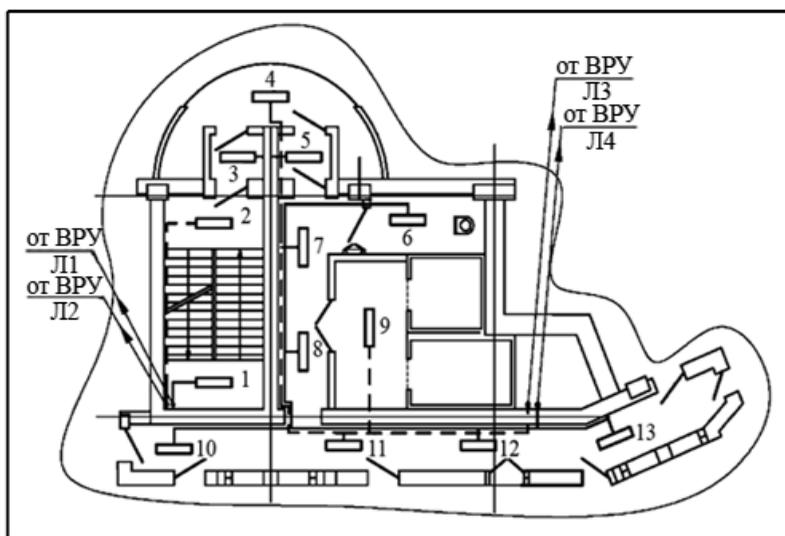


Рис. 5.5 План размещения и схема питания светильников для освещения общедомовых помещений и лестничных клеток:
1-13 – номера светильников; Л1-Л4 – групповые линии;
ВРУ – вводно-распределительное устройство

Светодиодный светильник типа ДПО-10-101 УХЛ4 [39] рассчитан на номинальное напряжение 230В, номинальная мощность 10Вт, сила потребляемого светильником из сети тока 0,07 мА, КПД

составляет не менее 70%, степень защиты /P20, масса не более 0,61 кг, габаритные размеры 342x103x68,5 мм.

Светотехнический расчет для каждого варианта освещения выполняется точечным методом [5,7]. В соответствии с данным методом расчет освещенности, лк, создаваемой каждым светильником, осуществляется по формуле

$$E = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos(\alpha)^3 \cdot \mu}{H_p^2 \cdot K_3}$$

где I_{α} – сила света, кд, определяется по кривым силы света (КСС) для каждого светового прибора (рисунки 5.6 и 5.7);

α – угол между направлением силы света и нормалью к освещаемой поверхности;

μ – коэффициент дополнительной освещенности, учитывающий освещенность, создаваемую от неучтенных светильников, стен и потолка (принимается равным 1,1-1,2);

H_p – расчетная высота подвеса светильника, т.е. расстояние от светильника до освещаемой поверхности;

K_3 – коэффициент запаса, $K_3 = 1,4$.

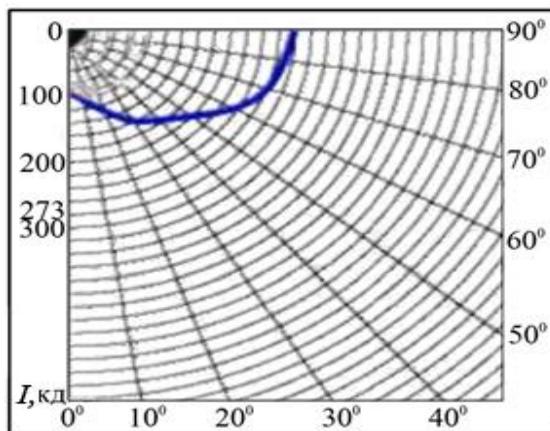


Рис. 5.6 КСС светильника типа ЛБО22-18-501

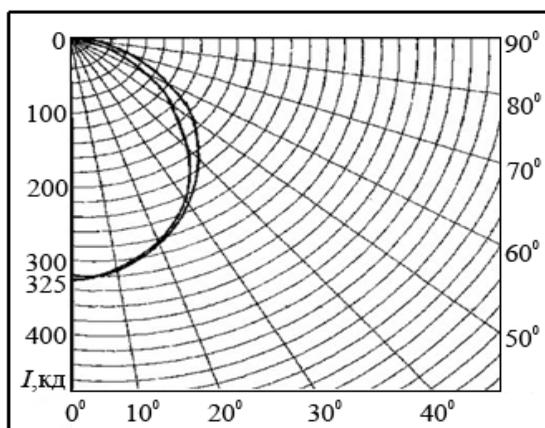


Рис. 5.7 КСС светильника типа ДПО 10-101

Определяем освещенность на лестничной площадке E_1 , создаваемую светильником №1, и в коридоре (рассматривается наименее освещенная точка, расположенная между светильниками №10 и №11, в этом случае искомая освещенность определяется как сумма освещенностей от одиночных светильников: $E_{10,11} = E_{10} + E_{11}$)

Результаты светотехнического расчета по обоим вариантам сведены в таблицу 5.8.

Таблица 5.8

Освещенность, создаваемая светильниками, установленными на лестничной площадке и в коридоре

| Тип светильника в осветительной установке | Освещенность, лк | | | |
|---|------------------|----------|----------|-------------|
| | E_1 | E_{10} | E_{11} | $E_{10,11}$ |
| ЛБО22-18-501 | 14,6 | 14,6 | 14,6 | 29,2 |
| ДПО-10-101 | 22,81 | 22,81 | 22,81 | 45,63 |

В соответствии с [13] нормируемая освещенность таких общественных помещений, как поэтажные коридоры, лифтовые холлы,

лестницы и лестничные площадки (на уровне пола) должна составлять 20 лк. Из полученных результатов, представленных в таблице 5.8 видно, что освещенность, создаваемая как светильниками марки ЛБО22-18-501, так и ДПО-10-101, соответствует требуемым нормам. При этом следует отметить, что в коридоре, где расположены входы в квартиры, освещенность, создаваемая светильниками со светодиодами, более чем в два раза превышает необходимое значение. Поэтому их количество можно уменьшить на один (исключаем светильник №12). Таким образом, при использовании светодиодных светильников ДПО-10-101 их количество для освещения общедомовых помещений одного этажа составит 12, а всего шестнадцатизэтажного дома – 192 шт., светильников ЛБО22-18-501 – соответственно 13 и 208 шт.

Схема питания светильников от вводно-распределительного устройства (ВРУ) дома выполнена в соответствии с требованиями [13], согласно которым светильники, расположенные на незадымляемых лестничных клетках в жилых и общественных зданиях, следует присоединять не менее чем к двум групповым линиям сети эвакуационного освещения. В данном случае на незадымляемой лестничной клетке расположено два светильника и каждый подключен к отдельной линии, питаемой от ВРУ. При проектировании электрической осветительной сети рассматриваемого дома для освещения одного этажа используется три линии аварийного эвакуационного освещения и одна линия рабочего освещения (Рис. 5.8).

Расчетные активные нагрузки линий освещения определены по формуле (5.1). Результаты расчета нагрузок каждой из четырех линий Л1, Л2, Л3 и Л4 (рис. 5.5) осветительной сети для одного этажа подъезда ($P_{л1,э}$, $P_{л2,э}$, $P_{л3,э}$, $P_{л4,э}$), всех этажей подъезда здания ($P_{л1,д}$, $P_{л2,д}$, $P_{л3,д}$, $P_{л4,д}$), двух подъездов ($P_{под}$), а также суммарная нагрузка общедомовых помещений и лестничных клеток всего дома ($P_{д}$) приведены в таблице 5.9.

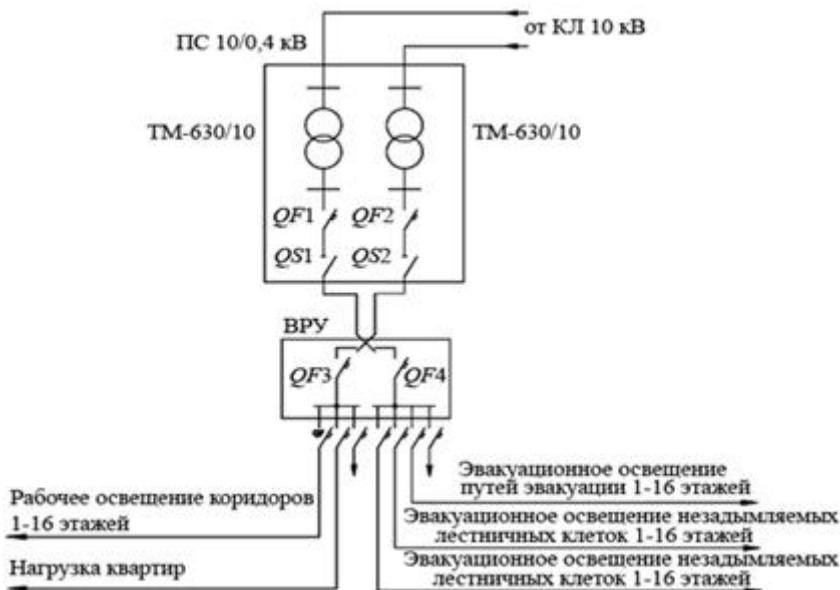


Рис. 5.8 Принципиальная схема электроснабжения жилого дома

Далее по формулам (2.4) и (5.2) по допустимому нагреву и допустимой потере напряжения производится выбор сечений жил кабелей для каждого участка осветительной сети. Полученные результаты представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.9
Расчетные нагрузки общедомовых помещений и лестничных клеток жилого дома

| Тип светильника в осветительной установке | Расчетная активная нагрузка, кВт | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|---------|
| | $P_{л1,э}$ | $P_{л1,д}$ | $P_{л2,э}$ | $P_{л2,д}$ | $P_{л3,э}$ | $P_{л3,д}$ | $P_{л4,э}$ | $P_{л4,д}$ | $P_{под}$ | $P_{д}$ |
| ЛБО22-18-501 | 0,02 | 0,32 | 0,02 | 0,32 | 0,12 | 1,9 | 0,1 | 1,58 | 4,12 | 8,24 |
| ДПО-10-101 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 0,16 | 0,06 | 0,96 | 0,95 | 0,8 | 2,08 | 4,16 |

Таблица 5.10

Кабели осветительной сети общедомовых помещений и лестничных
клеток жилого дома

| | | |
|----------------------------|---|--------------------------------|
| Участок осветительной сети | Марка кабеля, количество и сечение жил при использовании светильников | |
| | ЛБО22-18-501 | ДПО-10-101 |
| ТМ-630/10/0,4 – ВРУ | АВВГ-5×6-0,66 | АВВГ-5×4-0,66 |
| Линия 1 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 |
| Линия 2 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 |
| Линия 3 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 |
| Линия 4 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 | ВВГ _{нг} - 3×1,5-0,66 |

Из таблицы 5.10 видно, что вся распределительная сеть освещения мест общего пользования жилого дома выполнена кабелем марки ВВГ_{нг} с одинаковым количеством медных жил одинакового сечения, минимально допустимого по механической прочности. Поэтому стоимость всех кабелей распределительных линий будет одинаковой и не отразится в результатах технико-экономических расчетов при оценке каждого варианта. Однако при использовании светильников со светодиодными источниками света сечение токопроводящих жил кабеля питающей линии на ступень меньше, чем в случае применения для освещения люминесцентных газоразрядных низкого давления. Следовательно, использование для освещения светодиодных световых приборов приводит к уменьшению расхода проводникового материала и снижению стоимости осветительной сети дома.

Годовой расход электроэнергии на освещение общих помещений и лестничных клеток жилого здания для рассматриваемых вариантов исполнения осветительных установок определяется по формуле (5.3).

Учитывая то, что в доме незадымляемая лестничная клетка не имеет естественного освещения, то один из светильников, используемых для ее освещения, должен быть постоянно во включенном состоянии. Примем, что таким световым прибором является светильник №1 (рис. 5.5). При условии, что данный светильник будет работать 7 дней в неделю, для него годовое число использования максимума осветительной нагрузки $T_{max o}=8760$ ч [7]. Светильники №11 и №7 должны работать постоянно, так как они находятся на путях эвакуации людей, поэтому при расчете годового расхода электроэнергии для этих приборов также принимаем $T_{max o}=8760$ ч.

Светильники №2, №3, №5, №6, №8, №9, №10, №12 и №13 при отсутствии естественного освещения используются 7 дней в неделю. Однако их работа управляется датчиком движения, поэтому для этой группы световых приборов принимаем $T_{max o}=2150$ ч. Светильник №4 расположен на балконе-переходе, где присутствует естественное освещение. При условии, что он работает 7 дней в неделю, принимаем $T_{max o}=700$ ч. Полученные в результате расчета по формуле (5.3) данные показаны в таблице 5.11. Расчет потребленной электроэнергии производился с учетом потерь активной мощности в ПРА светильника с компактной люминесцентной лампой и в преобразовательном устройстве светодиодного светильника, который составляет 10% мощности лампы.

Таблица 5.11

Результаты расчета годового потребления электроэнергии

| Тип светильника | Номер светильника на плане | $P_{ном}$ Вт | T_{max} , ч | $W_{год}$, кВт · ч | Суммарный годовой расход электроэнергии, кВт · ч |
|-----------------|----------------------------|-----------------|------------------|---------------------------|---|
| ЛБО22-18-501 | 1 | 18 | 8760 | 173,4 | 917,5 |
| | 2 | | 2150 | 42,6 | |

| | | | | | |
|---|------------|------|------|-------|--|
| | 3 | | 2150 | 42,6 | |
| | 4 | | 700 | 13,9 | |
| | 5 | | 2150 | 42,6 | |
| | 6 | | 2150 | 42,6 | |
| | 7 | | 8760 | 173,4 | |
| | 8 | | 2150 | 42,6 | |
| | 9 | | 2150 | 42,6 | |
| | 10 | | 2150 | 42,6 | |
| | 11 | | 8760 | 173,4 | |
| | 12 | | 2150 | 42,6 | |
| | 13 | | 2150 | 42,6 | |
| | ДПО-10-101 | | 1 | 10 | |
| 2 | | 2150 | 23,7 | | |
| 3 | | 2150 | 23,7 | | |
| 4 | | 700 | 7,7 | | |
| 5 | | 2150 | 23,7 | | |
| 6 | | 2150 | 23,7 | | |
| 7 | | 8760 | 96,4 | | |
| 8 | | 2150 | 23,7 | | |
| 9 | | 2150 | 23,7 | | |

| | | | | | |
|--|----|--|------|------|--|
| | 10 | | 2150 | 23,7 | |
| | 11 | | 8760 | 96,4 | |
| | 13 | | 2150 | 23,7 | |

Данные, приведенные в таблице 5.11 показывают, что годовой расход электроэнергии на освещение общедомовых помещений и лестниц этажа при использовании светильников типа ДПО-10-101 на основе светодиодов в 1,9 раза меньше, чем в случае применения световых приборов типа ЛБО22-18-501 с компактными люминесцентными лампами. Это же относится и к годовому расходу электроэнергии на освещение общедомовых помещений и лестничных клеток всего дома.

Экономическую целесообразность рассматриваемых вариантов оценим по годовым приведенным затратам и значению чистого дисконтированного дохода [32,42]. Результаты технико-экономического расчета систем освещения общедомовых помещений и лестничных клеток жилого дома по приведенным затратам показаны в таблице 5.12.

Таблица 5.12

Основные технико-экономические показатели системы освещения общедомовых помещений жилого дома

| Тип светильника в осветительной установке | Число светильников, шт | Стоимость светильника, руб. | Кап-вложения, тыс. руб. | Срок службы лампы, Ч | Годовые издержки эксплуатации, млн. руб. | Приведенные затраты, млн. руб. |
|---|------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------------------|
| ЛБО22-18-501 | 208 | 24500 | 12070 | 10000 | 2057 | 2059 |
| ДПО-10-101 | 192 | 163170 | 31390 | 100000 | 885,9 | 890,6 |

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что относительно капитальных затрат вариант освещения с использованием светодиодных светильников оказался в 2,6 раза дороже варианта с использованием светильников на основе КЛЛ. Это в первую очередь связано с высокой стоимостью светодиодных светильников, которая примерно в 13 раз выше, чем светильников с КЛЛ. С другой стороны, затраты на эксплуатацию светильников типа ДПО-10-101 в 2,3 раза ниже, что является следствием значительно меньшего потребления электроэнергии.

В итоге приведенные затраты на реализацию проекта с использованием светодиодных светильников оказываются более чем в два раза меньше, чем затраты на систему электрического освещения с использованием светильников типа ЛБО22-18-501.

Результаты расчета чистого дисконтированного дохода для рассматриваемых вариантов осветительных установок общих помещений и лестничных клеток жилого дома представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13

Значения ЧДД системы освещения общедомовых помещений
жилого дома

| Тип светильника | Мощность лампы, Вт | Число светильников, шт | Горизонт расчета, лет | Срок службы лампы, ч | ЧДД, млн. руб. |
|-----------------|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| ЛБО22-18-501 | 18 | 208 | 10 | 10000 | -10330 |
| ДПО-10-101 | 10 | 192 | 10 | 100000 | -4477 |

6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ

Результаты расчета показывают, что у проекта с использованием светодиодных светильников значение ЧДД больше, следовательно, он является экономически целесообразным.

Таким образом, произведенные расчеты показывают, что внедрение светодиодного освещения экономически выгодно. Эта выгода будет еще более очевидной по мере снижения их стоимости и появления светодиодов с большей световой отдачей. Однако следует иметь в виду, что на пути к широкому внедрению светодиодного освещения существует еще ряд нерешенных вопросов, как, например, отсутствие необходимых технических регламентов и нормативов, что затрудняет проектирование таких осветительных установок.

6.1. Общая характеристика и классификация методов

Эффективность работы осветительных установок оценивается экономичностью, качеством, удобством эксплуатации, экологичностью и безопасностью работы систем электрического освещения. Методы обеспечения эффективности работы осветительных установок можно условно разделить на два вида:

- 1) не требующие дополнительных капитальных вложений в процессе эксплуатации систем электрического освещения;
- 2) связанные с дополнительными капитальными затратами на обеспечение электрического освещения.

Без дополнительных финансовых затрат эффективность работы осветительных установок обеспечивается путем их рациональной эксплуатации, направленной на снижение расхода электроэнергии на освещение и поддержание характеристик световых приборов и электрических сетей, предусмотренных проектом осветительного электрооборудования. Эти методы предусматривают проведение регулярного профилактического обслуживания и систематического контроля работы осветительных установок, измерений уровней освещенности помещений, напряжения и токов нагрузок электрических сетей, регулярную чистку световых проемов в зданиях, свое-

временное отключение световых приборов при отсутствии в помещении людей и т.п.

Дополнительные капитальные затраты на повышение эффективности осветительных установок могут быть связаны с заменой источников света или световых приборов на более эффективные, совершенствованием управления световыми приборами, внедрением устройств регулирования напряжения, подавления высших гармоник тока и напряжения. В ряде случаев может осуществляться коренная реконструкция систем электрического освещения, требующая выполнения большого объема проектных и строительно-монтажных работ, связанная со значительными финансовыми и материальными затратами. Например, серьезная реконструкция систем освещения и электрических сетей потребуется при переходе на светодиодное освещение.

Эффективность работы осветительных установок должна закладываться при проектировании систем электрического освещения объектов и поддерживаться при их эксплуатации.

При проектировании систем электрического освещения она обеспечивается обоснованным выбором элементов осветительных установок (источников света, светильников, пускорегулирующих аппаратов (ПРА), устройств управления освещением, защитных аппаратов, проводов и кабелей и т.д.). Важно также учитывать электромагнитную совместимость устройств электрического освещения и электрических сетей, а также совместимость осветительных установок с окружающей средой, в которой они используются. Надежность и эффективность работы электрических сетей осветительных установок в значительной степени зависит от качества применяемых электротехнических и светотехнических изделий, правильного их выбора и грамотной эксплуатации систем электрического освещения.

Для обеспечения надежной и эффективной работы электрических осветительных сетей в процессе эксплуатации необходимо строго соблюдать требования действующих инструкций и других технических документов по применению электрооборудования и световых приборов, выполнять необходимые регламентные работы по обслуживанию осветительных установок. В ходе эксплуатации следует поддерживать технические характеристики осветительных

установок, принятые в проекте осветительного электрооборудования.

При выборе сечений нулевых рабочих проводников сетей электрического освещения необходимо учитывать наличие в них токов высших гармонических составляющих, кратных трем, даже при равномерной нагрузке фаз. Ток в нулевом проводнике имеет особенно большие значения при использовании компенсированных ПРА газоразрядных ламп, [15] отмечается, что пропускная способность нулевых проводников должна соответствовать току наиболее загруженной фазы. Однако при неблагоприятном стечении обстоятельств ток в нулевых проводниках в осветительных сетях может превышать ток фазного проводника. Это не учитывается при проектировании осветительных установок, что может привести к снижению надежности электрических сетей.

Повышение эффективности использования осветительных установок тесно связано с вопросами рационального использования электроэнергии. Одной из первостепенных задач энергосбережения в электрическом освещении является исключение из применения ламп накаливания в полном объеме. В Республике Беларусь по ориентировочным данным лампами накаливания за год потребляется примерно 0,7 миллиарда кВт·ч электрической энергии. Замена их, например, на энергоэффективные компактные люминесцентные лампы позволяет сэкономить порядка 0,5 миллиарда кВт·ч электроэнергии в год.

Применение автоматических систем управлением освещением и энергоэффективных осветительных устройств, в том числе и на основе светодиодов, имеет приоритетное значение в энергосбережении.

6.2. Оценка снижения расхода электроэнергии на освещение за счет внедрения энергосберегающих мероприятий

Нерациональные затраты на искусственное освещение в первую очередь обусловлены использованием неэкономичных световых приборов, оснащенных лампами с небольшой световой отдачей, а также эксплуатацией физически изношенных светильников, в которых отражатели и рассеиватели существенно снизили свои оптиче-

ские характеристики. На промышленных предприятиях повышенные затраты электроэнергии на освещение во многих случаях объясняется применением световых приборов с низким значением коэффициента полезного действия и малоэффективным распределением силы света.

Повышение эффективности использования электроэнергии на освещение сводится к решению следующих основных задач:

- проектирование систем электрического освещения на основе современных нормативно-технических документов с учетом достижений научно-технического прогресса в электрическом освещении;
- совершенствование световых приборов и повышение качества изготовления светотехнических изделий;
- повышение экономичности систем электрического освещения путем использования энергетически эффективных световых приборов;
- совершенствование способов искусственного освещения с учетом максимального использования естественного света;
- повышение уровня эксплуатации осветительных установок;
- совершенствование способов и средств управления осветительными установками;
- обеспечение требуемого качества напряжения, подводимого к зажимам световых приборов;
- стимулирование потребителей электроэнергии за применение энергосберегающих источников света;
- повышение уровня энергетической культуры населения.

Снижение затрат на искусственное освещение главным образом связано с уменьшением расхода электроэнергии в осветительных установках, который можно представить в таком виде:

$$W_0 = W_{\text{сп}} + \Delta W_{\text{пра}} + \Delta W_{\text{эс}}, \quad (6.1)$$

где $W_{\text{сп}}$ – потребление электроэнергии непосредственно световыми приборами;

$\Delta W_{\text{пра}}$ – потери электроэнергии в пускорегулирующих аппаратах;

$\Delta W_{\text{эс}}$ – потери электроэнергии в электрических сетях осветительных установок.

В выражении (6.1) первое слагаемое имеет наибольшее значение и при применении для освещения газоразрядных ламп составляет

около 80 – 90 % от общего расхода электроэнергии. Поэтому при создании систем электрического освещения в первую очередь необходимо стремиться к максимальному снижению величины $W_{\text{ст}}$.

Основы рационального использования электроэнергии в осветительных установках закладываются при их проектировании. В проектах необходимо применять наиболее экономичные источники света, обеспечивающие требуемые уровни освещенности и показатели качества освещения. В целях экономии энергоресурсов в осветительных установках следует использовать преимущественно газоразрядные лампы [13]. Энергоэкономичные люминесцентные лампы мощностью 18, 36 и 58 Вт для создания одной и той же освещенности потребляют на 7–8 % меньше электроэнергии по сравнению с обычными люминесцентными лампами мощностью 20, 40 и 65 Вт. При этом вместо люминесцентных ламп типа T12 мощностью 20, 40 и 65 Вт, как правило, применяются более экономичные их аналоги типа T8 или T5 мощностью 18, 36 и 58 Вт. Отметим, что в настоящее время по электропотреблению лампы типа T5 являются наиболее эффективными разрядными источниками света низкого давления.

Для достижения рационального расхода электроэнергии на освещение необходимо правильно выбрать схему освещения, тип, число и мощность ламп, типы применяемых светильников, а также оптимально разместить их в помещениях, обеспечивая равномерное распределение освещенности.

Весьма важно для экономии энергоресурсов применять световые приборы с высоким значением коэффициента полезного действия. Отметим, что его значение лежит в диапазоне от 46 до 88 %. Следует по возможности выбирать светильники с более высоким КПД, значение которого зависит от применяемых отражателей. Чем лучше отражатель, тем выше КПД. Использование рассеивателей существенно снижает КПД светильников. У светильников без рассеивателей с экранирующими решетками КПД светильников с люминесцентными лампами повышается до 75 %. В световых приборах без экранирующих и рассеивающих элементов КПД достигает 85 % и более. Однако требования ГОСТ 8607 – 82 «Светильники для жилых и общественных зданий» не позволяют применять в административных помещениях светильники без рассеивателей, которые играют защитную роль в случае разрушения или выпадения лампы, а

также обеспечивают комфортность освещения и эстетическое восприятие световых приборов.

Совершенствование средств электрического освещения в процессе их разработки и создания должно осуществляться в направлении повышения КПД и эффективности светораспределения, а также стабилизации светового потока и характеристик световых приборов в ходе эксплуатации. Для этого с учетом современных тенденций и инноваций в светотехнике, предъявляемых требований к качеству и энергоэффективности осветительных установок, должны создаваться новые, высокоэффективные световые приборы для различных отраслей промышленности с учетом специфики их применения в конкретных условиях производства. На промышленных предприятиях большинство помещений имеют не благоприятные условия окружающей среды (жаркие, сырые, пыльные, пожароопасные и т.д.). При этом помещения, в которых осуществляются разнообразные технологические процессы, могут отличаться по высоте и строительным модулям. Следовательно, для освещения требуются световые приборы с разными источниками света, разного исполнения и светораспределения, должного технического уровня и дизайна.

Проблема повышения энергоэффективности осветительных установок тесно связана с вопросами качества освещения и надежности функционирования самих устройств освещения. Применяемые новые энергоэффективные источники света и световые приборы не должны ухудшать качественные показатели освещения. Экономить энергию, ухудшая условия работы и отдыха людей, недопустимо. Низкое качество изготовления электрических ламп, светильников и пускорегулирующих аппаратов сводит на нет усилия по экономии энергоресурсов и приводит к неоправданным денежным затратам потребителей электроэнергии на замену отказавших устройств. На промышленных предприятиях преждевременный выход из строя газоразрядных источников света, помимо непосредственных затрат на приобретение и установку новых ламп, увеличивает расходы на утилизацию отказавших ламп. Кроме того, это дискредитирует саму идею энергосбережения. Если, например, энергосберегающая лампа или электронный пускорегулирующий аппарат при правильной эксплуатации не обладают заявленными характеристиками или не выдерживают среднего срока службы, то убедить пользователей в

целесообразности дальнейшего применения таких устройств достаточно сложно.

В условиях эксплуатации осветительных установок наиболее ощутимую экономию электроэнергии можно получить за счет применения энергетически эффективных источников света. В некоторых случаях более экономичные лампы можно установить в старые светильники, но чаще всего такая замена производится путем реконструкции осветительной установки с демонтажем старых и установкой новых светильников с энергосберегающими источниками светового излучения.

Экономия электроэнергии за счет замены ламп с установленной мощностью $P_{ном1}$ на более эффективные лампы с установленной мощностью $P_{ном2}$, обеспечивающие требуемое качество освещения, определяется по формуле

$$\Delta W_o = K_c \cdot (K_{ПРА1} \cdot P_{ном1} - K_{ПРА2} \cdot P_{ном2}) \cdot T_{max \ o},$$

где $K_{ПРА1}$ и $K_{ПРА2}$ – коэффициенты, учитывающие потери в ПРА соответствующих ламп;

$T_{max \ o}$ – годовое число часов использования максимума осветительной нагрузки.

В процессе эксплуатации в светильниках следует применять лампы, предусмотренные в проектах и соответствующие нормам освещенности. Завышение установленной мощности осветительных приборов приводит к повышению тока нагрузки и, следовательно, температуры нагрева проводников, что может иметь негативные последствия, а также к неоправданному перерасходу электроэнергии, определяемому по выражению

$$\Delta W_o = K_{co} \cdot K_{ПРА} \cdot (P_{фo} - P_{но}) \cdot T_{max \ o},$$

где $P_{фo}$ – фактическая мощность ламп; $P_{но}$ – установленная мощность ламп, предусмотренная проектом или необходимая для обеспечения нормированной освещенности.

Относительная экономия (или перерасход) электроэнергии, получаемая при использовании вместо одного источника света (1) другого (2), может быть определена по выражению

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{K_{ППА2} \cdot E_{н2} \cdot C_2 \cdot K_{з2} \cdot H_1}{K_{ППА1} \cdot E_{н1} \cdot C_1 \cdot K_{з1} \cdot H_2} \right) \cdot 100\% \quad (6.2)$$

где $E_{н1}$ и $E_{н2}$ – нормируемые уровни освещенности для осветительных установок с источниками света 1 и 2 в случае замены ламп накаливания газоразрядными лампами;

C_1 и C_2 – отношение минимальной расчетной освещенности к нормированной для источников света 1 и 2 ($0,9 \leq C \leq 1,2$);

$K_{з1}$ и $K_{з2}$ – коэффициенты запаса в осветительных установках с источниками света 1 и 2;

H_1 и H_2 – световая отдача источников света 1 и 2.

Положительное значение $\Delta W\%$ соответствует экономии, отрицательное – перерасходу электроэнергии.

При одинаковых значениях расчетных коэффициентов и уровня освещенности выражение (6.2) приобретает вид

$$\Delta W\% = \left(1 - \frac{H_1}{H_2} \right) \cdot 100\% \quad (6.3)$$

Абсолютная экономия электроэнергии при использовании более эффективных источников света определяется по следующей формуле:

$$\Delta W_0 = K_{со} \cdot P_{ном1} \cdot T_{мах} \cdot \frac{\Delta W\%}{100}$$

По формулам (6.2) и (6.3) с использованием средней световой отдачи ламп произведен расчет возможной относительной экономии электроэнергии при переходе на освещение более эффективными источниками света. Результаты расчета показаны в таблице 6.1.

Приведенные в таблице 6.1 данные характеризуют источники света только по затратам электроэнергии, подтверждая высокую энергетическую эффективность разрядных люминесцентных ламп низкого давления и высокого давления типов ДРИ, ДРЛ, ДНаТ, а также источников света на основе светодиодов. В тоже время отметим, что выбор источников света представляет собой многокритериальную задачу, решение которой требует учета разнообразных

факторов: стоимости светотехнических изделий, их срока службы, требуемой цветопередачи, надежности работы ПРА, устройств управления и т.д.

При выборе светильников типа РСЦ, ГСП и ЖСП с газоразрядными лампами высокого давления следует отдавать предпочтение световым приборам с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, обеспечивающим коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi \geq 0,85$. Применение для люминесцентных ламп низкого давления электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА) оказывается экономически выгодным за счет получаемой экономии электроэнергии.

Таблица 6.1

Относительная экономия электроэнергии при использовании более эффективных источников света

| Заменяемый источник света | | Заменяющий источник света | | Средняя относительная экономия электроэнергии, % |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| Тип | Средняя световая отдача, лм/Вт | Тип | Средняя световая отдача, лм/Вт | |
| Лампы накаливания | 15 | Галогенные лампы накаливания | 26 | 42 |
| Лампы накаливания | 15 | Компактные люминесцентные лампы | 61,5 | 68 |
| Лампы накаливания | 15 | Люминесцентные лампы низкого давления | 75,5 | 72 |
| Лампы накаливания | 15 | Металлогалогенные лампы типа ДРИ | 87 | 78 |

| | | | | |
|----------------------------------|----|---|-------|----|
| Лампы накаливания | 15 | Дуговые ртутные лампы типа ДРЛ | 48 | 60 |
| Лампы накаливания | 15 | Натриевые лампы высокого давления типа ДНаТ | 102,5 | 81 |
| Лампы накаливания | 15 | Ксеноновые трубчатые лампы | 31,5 | 38 |
| Лампы накаливания | 15 | Источники света на основе светодиодов | 52,5 | 71 |
| Галогенные лампы накаливания | 26 | Источники света на основе светодиодов | 52,5 | 50 |
| Дуговые ртутные лампы типа ДРЛ | 48 | Люминесцентные лампы низкого давления | 64 | 31 |
| Дуговые ртутные лампы типа ДРЛ | 48 | Металлогалогенные лампы типа ДРИ | 87 | 45 |
| Дуговые ртутные лампы типа ДРЛ | 48 | Натриевые лампы высокого давления типа ДНаТ | 102,5 | 76 |
| Металлогалогенные лампы типа ДРИ | 87 | Натриевые лампы высокого давления типа ДНаТ | 102,5 | 15 |

Если потери мощности в электромагнитных ПРА составляют не менее 15 % от мощности ламп, то потери в ЭПРА – не более 10 %. ЭПРА обеспечивают получение переменного напряжения частотой свыше 30 кГц, что приводит к увеличению на 20 – 30 % световой

отдачи люминесцентных ламп. Поэтому при одном и том же световом потоке светильники с ЭПРА потребляют меньшую мощность, что и определяет их экономичность.

Еще одним ресурсом энергосбережения в осветительных установках является максимальное использование естественного освещения, что достигается применением автоматического управления осветительными установками в функции освещенности помещения или по заданной программе. В частности, в производственных, служебно-бытовых, торговых и учебных помещениях возможна установка светильников с лампами Т5, имеющих датчики уровня освещенности и автоматическое регулирование величины необходимого светового потока. Это снижает расход электроэнергии осветительными установками на 5–15 %.

Для сокращения продолжительности включения ламп могут применяться системы управления осветительными установками, обеспечивающие отключение рядов светильников, расположенных параллельно окнам, в зависимости от уровня естественной освещенности.

Использование интегрального (совмещенного) освещения помещений, в которые естественный свет проникает в недостаточном количестве или не проникает вообще (например, в подземных сооружениях), с помощью полых световодов и традиционных световых приборов позволяет более рационально расходовать электроэнергию на освещение. Такие осветительные установки целесообразно применять в высоких одноэтажных зданиях с высокой плотностью расположения оборудования, а также в помещениях, заглубленных в землю.

Благоприятно влияет на использование осветительных установок своевременная и надлежащая окраска колонн, ферм, стен, потолков зданий и производственного оборудования в светлые тона. Снизить время использования установок искусственного освещения в помещениях зданий, имеющих большую площадь остекления, можно путем регулярного (не менее двух раз в год) мытья стекол, что приводит к экономии электроэнергии до 3 %.

Одной из причин высокого расхода электроэнергии на освещение является эксплуатация на промышленных предприятиях, в общественных и жилых зданиях морально устаревших и физически изношенных световых приборов с мало эффективными источниками

ми света и светораспределением, не всегда соответствующем требованиям освещения конкретного объекта. С целью снижения затрат электроэнергии на освещение такие приборы должны быть заменены на более эффективные устройства освещения.

Также до 3 % экономии электроэнергии можно получить за счет выполнения регламентированных [13] периодических очисток светильников от пыли и грязи на месте установки или в мастерской (не менее 18 очисток в год в наиболее пыльных помещениях, 6 – в помещениях со средним выделением пыли, 4 – в помещениях с невысоким уровнем запыленности и на территории пыльных производств, 2 – на территории городов и непыльных производств), а также поддержанием в чистоте световых проемов окон, фонарей и т. п.

Одним из условий рационального расходования электроэнергии является поддержание уровней напряжения в осветительной сети в допустимых пределах: от 95 до 105 % номинального напряжения $U_{\text{ном}}$.

Относительное изменение расхода электроэнергии на освещение в зависимости от напряжения, подведенного к световым приборам, численно равно изменению потребляемой ими мощности. С учетом формул (3.5), (3.8) и (3.11), процентное изменение потребления активной электроэнергии световыми приборами в функции от величины установившегося отклонения напряжения δU_o , выраженного в процентах от $U_{\text{ном}}$, определяется по следующим выражениям:

а) для световых приборов с лампами накаливания:

$$\delta W = \left[\left(1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^{1,58} - 1 \right] \cdot 100 \quad (6.4)$$

б) для световых приборов с люминесцентными лампами низкого давления (в комплекте с пускорегулирующими аппаратами):

$$\delta W = 2 \cdot \delta U_y \quad (6.5)$$

в) световых приборов с металлогалогенными лампами типа ДРИ (в комплекте с пускорегулирующими аппаратами):

$$\delta W = 2,2 \cdot \delta U_y \quad (6.6)$$

г) для световых приборов с лампами типа ДРЛ (в комплекте с пускорегулирующими аппаратами):

$$\delta W = 2,43 \cdot \delta U_y \quad (6.7)$$

В таблице 6.2 приведены результаты расчетов, выполненные по выражениям (6.4) – (6.7), показывающие, на сколько увеличивается потребление активной электроэнергии световыми приборами с различными лампами при повышении напряжения на величину от одного до десяти процентов по отношению к $U_{ном}$.

Данные, приведенные в таблице 6.2 показывают, что для экономии электроэнергии необходимо по возможности понижать эксплуатационное напряжение, поддерживая его величину в допустимых пределах (не ниже $0,95 U_{ном}$). Для снижения уровней напряжения в осветительных сетях применяются специальные тиристорные ограничители напряжения. Отметим, что повышение напряжения существенно снижает срок службы источников света.

С целью экономии энергоресурсов необходимо заинтересовать потребителей в применении эффективных источников света. Для стимулирования бытовых потребителей электроэнергии за использование энергосберегающих ламп целесообразно предоставлять определенные льготы по оплате за электроэнергию лицам, приобретающим такие лампы. Для повышения экологической безопасности должна быть создана система централизованного сбора у населения отказавших источников света, содержащих ртуть, и их последующей утилизации на специализированных предприятиях.

Важнейшее значение в энергосбережении имеет повышение энергетической культуры (уровня понимания проблем энергетики и рационального использования энергоресурсов) всего населения, воспитание у людей с детских лет бережного отношения к электроэнергии и другим видам энергоресурсов.

Таблица 6.2

**Увеличение расхода электроэнергии световыми приборами
при повышении напряжения**

| Повышение напряжения, % | Увеличение потребления электроэнергии, %, световыми приборами, в которых используются лампы | | | |
|-------------------------|---|---------------------------------|------|------|
| | накаливания | люминесцентные низкого давления | ДРИ | ДРЛ |
| 1 | 1,6 | 2,0 | 2,2 | 2,4 |
| 2 | 3,2 | 4,0 | 4,4 | 4,9 |
| 3 | 4,8 | 6,0 | 6,6 | 7,3 |
| 4 | 6,4 | 8,0 | 8,8 | 9,7 |
| 5 | 8,0 | 10,0 | 11,0 | 12,2 |
| 6 | 9,6 | 12,0 | 13,2 | 14,6 |
| 7 | 11,3 | 14,0 | 15,4 | 17,0 |
| 8 | 12,9 | 16,0 | 17,6 | 19,4 |
| 9 | 14,6 | 18,0 | 19,8 | 21,9 |
| 10 | 16,3 | 20,0 | 22,0 | 24,3 |

6.3. Способы снижения уровня высших гармоник тока и напряжения в электрических осветительных сетях

Снижения уровня высших гармоник можно достигнуть путем устранения их в генерирующих устройствах (источниках света и световых приборах) и в электрических сетях осветительных установок. Следовательно, к решению данной проблемы должны быть привлечены специалисты разного профиля: конструирующие и создающие световые приборы, проектирующие и эксплуатирующие осветительные установки.

Как отмечалось выше, применение компенсированных электромагнитных ПРА газоразрядных ламп увеличивает относительное

значение токов третьей и пятой гармоник. Поэтому более эффективным является использование электронных ПРА (ЭПРА), повышающих коэффициент мощности до более высоких значений по сравнению с электромагнитными компенсированными ПРА. В связи с тем, что компенсированные ПРА имеют коэффициент мощности ($\cos\phi$) не менее 0,85, а ЭПРА - не менее 0,95, то и гармонический состав потребляемого тока у ЭПРА значительно лучше.

Для снижения тока высших гармоник и повышения коэффициента мощности газоразрядных ламп применяется его активная коррекция с помощью корректора коэффициента мощности (ККМ). Английская аббревиатура данного устройства – *PFC (power phase corrector)*. Корректор представляет собой преобразователь напряжения, который входит в состав ЭПРА. Он является так называемым бустерным конвертером (*BC - boost converter*), снабженным специальной схемой управления.

Целесообразно отметить, что с целью повышения конкурентоспособности продукции производители светотехнических изделий, стремясь снизить себестоимость компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), во многих случаях не используют ККМ в ЭПРА. Применение в ЭПРА с целью снижения стоимости КЛЛ наиболее дешевых электронных элементов, не обладающих достаточным запасом прочности по напряжению, приводит к отказам КЛЛ при появлении в электрической осветительной сети импульсов перенапряжения.

Отметим, что в Республике Беларусь ЭПРА широко используются в световых приборах с люминесцентными лампами низкого давления. Светильники с газоразрядными лампами высокого давления, как правило, комплектуются некомпенсированными электромагнитными ПРА. В то же время ведущими производителями светотехнической продукции для ламп типа ДНаТ, ДРИ выпускаются два вида ЭПРА, различающиеся по частоте тока лампы. В высокочастотных ЭПРА частота тока лампы достигает величины порядка 130 кГц. При этом регулирование мощности лампы осуществляется за счет изменения частоты тока лампы. В низкочастотных ЭПРА частота тока лампы неизменна и имеет значение 100 Гц (возможны некоторые отклонения от этой величины), регулирование мощности лампы осуществляется за счет изменения амплитуды тока лампы. Применение в ЭПРА активного ККМ решает проблемы электро-

магнитной совместимости ЭПРА с питающей сетью и повышения коэффициента мощности.

При использовании в осветительных установках электронных ЭПРА с активным корректором реактивной мощности гармонический состав потребляемого тока почти на порядок лучше, чем при применении световых приборов с электромагнитными ПРА. Следует учитывать, что гармонический состав потребляемого тока не постоянен и зависит как от величины подведенного напряжения, так и от потребляемой мощности. Для ЭПРА общий коэффициент высших гармоник находится в диапазоне от 3 до 10%. При этом наихудшее (максимальное) значение коэффициента достигается при максимально допустимом питающем напряжении. Следовательно, повышение напряжения в осветительной сети не только увеличивает ток нагрузки в соответствии со статическими характеристиками световых приборов, но и усиливает действие высших гармоник.

Отметим, что отказ ПРА во всех случаях приводит к отказу в работе светового прибора. Поэтому важно обеспечить надежную работу комплекта «ПРА – газоразрядная лампа». При этом срок службы ПРА должен быть сопоставимым со средней продолжительностью горения ламп. Если данный срок окажется меньше числа часов работы источников света, то это неизбежно приведет к снижению надежности систем электрического освещения и повышению затрат на их эксплуатацию. Надежность функционирования ПРА зависит от надежности работы и долговечности входящих в его состав элементов, в том числе и статических конденсаторов. Применение в ЭПРА комплектующих элементов невысокого качества снижает эффективность осветительных устройств. На работу компонентов ПРА оказывают влияние условия окружающей среды, в первую очередь температура воздуха в пространстве, в котором находятся световые приборы.

Рассмотрим другие способы снижения уровня высших гармоник, которые могут применяться в осветительных установках с целью повышения надежности и эффективности электрических сетей. В частности, значения высших гармонических составляющих тока в электрических сетях могут быть уменьшены последовательным включением линейных дросселей. Это простейший способ снижения уровня высших гармоник тока, генерируемых нелинейными нагрузками во внешнюю сеть. Такой дроссель обладает малым зна-

чением индуктивного сопротивления на основной частоте (50 Гц) и повышенными сопротивлениями для высших гармоник тока, что приводит к их ослаблению. Дроссели, установленные на питающих и распределительных линиях, уменьшают генерирование высших гармоник во внешнюю сеть по отношению к точке их подключения.

В некоторых сетях применение последовательно включенных линейных дросселей не позволяет уменьшить гармонические искажения кривой тока до желаемого результата. В этом случае целесообразно использовать пассивные индуктивно-емкостные LC -фильтры, настроенные на определенный порядок гармоник. В осветительных сетях с газоразрядными источниками света в первую очередь следует подавлять высшие гармоники тока 3, 5 и 7-го порядка.

В осветительных установках могут использоваться активные кондиционеры гармоник (АКГ). Их принцип действия основан на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерировании в электрическую сеть высших гармоник тока определенного порядка, но с противоположной фазой. В результате высшие гармонические составляющие тока нейтрализуются в точке подключения АКГ. Следовательно, они не распространяются от нелинейной нагрузки в питающую сеть и не искажают напряжение источника питания.

Необходимо иметь в виду, что использование линейных дросселей, пассивных фильтров и АКГ не устраняет воздействие высших гармоник на групповую осветительную сеть. Поэтому более эффективным средством снижения уровня высших гармоник является применение в осветительных установках с газоразрядными лампами световых приборов, оснащенных ЭПРА.

В заключение отметим, что проблема высших гармоник в электрических сетях осветительных установок станет менее актуальной при внедрении световых приборов с принципиально новыми источниками света – светодиодами. Однако в этом направлении необходимо выполнить соответствующие исследования.

6.4. Особенности выбора устройств защиты от сверхтоков в осветительных установках

При проектировании осветительного электрооборудования для обеспечения надежности электрических сетей в первую очередь не-

обходимо правильно выбрать устройства защиты от сверхтоков и согласовать их защитные характеристики с допустимыми токами проводников.

Согласно [25] сети должны иметь защиту от токов короткого замыкания (КЗ), обеспечивающую по возможности наименьшее время отключения и требования селективности (избирательности). Защита должна эффективно отключать поврежденный участок при КЗ в конце защищаемой линии. От токов длительной перегрузки необходимо защищать следующие электрические сети освещения внутри помещений [25]:

- сети, выполненные открыто проложенными проводниками с горючей наружной оболочкой или изоляцией;
- осветительные сети в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети для бытовых и переносных электроприемников (утюгов, чайников, плиток, холодильников, пылесосов, стиральных и швейных машин и т.п.), а также в пожароопасных зонах;
- сети во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia, В-II и В-IIa.

Из приведенного выше следует, что сети электрического освещения в цехах, которые не являются пожароопасными и не имеют взрывоопасных зон классов В-I, В-Ia, В-II и В-IIa, защищать от токов длительной перегрузки не обязательно. При этом преследуется цель предотвратить возможные пожары и взрывы в освещаемых помещениях из-за перегрузки проводников, предполагая небольшую вероятность возникновения тока перегрузки линий, обеспечивающих работу осветительных установок. Действительно, светильники в производственных помещениях находятся на достаточно большой высоте, что затрудняет замену световых приборов на более мощные, которые могут вызвать перегрузку проводов и кабелей по току, и защищает осветительные установки от несанкционированных действий персонала по изменению в процессе эксплуатации технических характеристик сетей, предусмотренных проектом.

При защите электрических цепей от токов перегрузки необходимо обеспечивать согласованность применяемых проводников и защитных устройств. Плавкие предохранители и автоматические выключатели должны отключать ток перегрузки. Для этого рабочая защитная характеристика любого защитного устройства, защи-

шающего проводники от перегрузки, должна соответствовать следующим условиям [46]:

$$I_p \leq I_{\text{ном з}} \leq I_{\text{доп}}$$

$$I_{\text{ср з}} \leq 1,45 I_{\text{доп}}$$

где I_p – расчетный (рабочий) ток защищаемой линии;

$I_{\text{ном з}}$ – номинальный ток устройства защиты (плавкой вставки предохранителя, теплового или комбинированного расцепителя автомата);

$I_{\text{ср з}}$ – ток, обеспечивающий надежное срабатывание устройства защиты, который принимается равным току срабатывания автоматического выключателя или току плавления плавкой вставки предохранителя при заданном времени срабатывания устройства защиты.

При этом требуемое время срабатывания определяется по защитной характеристике автоматического выключателя или предохранителя в зависимости от принимаемой допустимой длительности возможной перегрузки.

Перегрузка сетей освещения может быть вызвана разными причинами. В частности, повышением напряжения в электрической сети в нерабочее время, когда снижается или отсутствует нагрузка силовых электроприемников. Это приводит к уменьшению потерь напряжения в сетях и, следовательно, к повышению напряжения на зажимах электроприемников.

Выход из строя конденсаторов компенсированных электромагнитных ПРА газоразрядных ламп может повлечь за собой перегрузку групповых, распределительных и питающих линий. При использовании групповой компенсации реактивной мощности световых приборов с газоразрядными лампами высокого давления отключение или отказ компенсирующего устройства вызывает перегрузку распределительных и питающих линий, если они не имеют запаса по пропускной способности.

При длительном сроке эксплуатации газоразрядных ламп высокого давления в световых приборах с электромагнитными ПРА с течением времени может проявляться так называемый выпрямительный эффект, который заключается в следующем. В стареющих газоразрядных лампах высокого давления возникает асимметрия

тока лампы, связанная с неравномерной деградацией электродов. В этом случае лампа на одном из полупериодов питающего напряжения работает чуть дольше, чем на другом. При этом нарушается симметрия потребления тока лампой, и соответственно, возникает некоторая постоянная составляющая тока в питающей сети. Режим работы дросселя электромагнитного ПРА изменяется, в результате чего дроссель начинает работать с подмагничиванием.

В режиме подмагничивания резко увеличиваются потери мощности в магнитопроводе, что вызывает повышение температуры нагрева дросселя и проводников электрической сети освещения. Это вызывает ускоренный тепловой износ и даже повреждение изоляции проводов и кабелей, если они не обладают определенным запасом по пропускной способности. При подмагничивании дополнительно генерируются высшие гармоники тока, а также усиливается асимметрии тока лампы, вызывающая ускоренную деградацию источника света. Ситуация может дополнительно усугубиться низким качеством питающего напряжения.

В связи с этим в осветительных установках с газоразрядными лампами высокого давления и электромагнитными ПРА необходимо применять тепловую защиту дросселя, как это рекомендует стандарт МЭК 60662, или производить замену ламп до наступления периода, когда возможно проявление выпрямительного эффекта. В последнем случае это целесообразно делать через 7 тыс. часов эксплуатации. Отметим, что при возникновении выпрямительного эффекта световой поток источника света снижается на 15-20%.

Для повышения надежности работы электрических сетей и предотвращения возможных длительных перегрузок проводников, которые могут вызвать отказы электрооборудования, пожары и взрывы, рекомендуется применять световые приборы с ЭПРА.

Для защиты электрических сетей от токов длительных перегрузок в осветительных установках применяются автоматические выключатели с комбинированным расцепителем. Несмотря на существующие требования по защите электрических сетей освещения от тока длительной перегрузки, защитные аппараты в силу специфических особенностей их действия допускают некоторую перегрузку проводников. Это связано с тем, что надежное срабатывание автоматического выключателя происходит, как правило, при выполнении следующего условия:

$$I_{\text{ср}} \geq 1,45 I_{\text{номр}}$$

где $I_{\text{номр}}$ - номинальный ток теплового расцепителя автоматического выключателя расцепителя.

В связи с этим, если автоматический выключатель выбран в соответствии с требованиями [25], то значение $I_{\text{номр}}$ может быть равно длительно допустимому току проводника $I_{\text{доп}}$. Следовательно, провода или кабели могут длительно работать с током нагрузки $I_p \approx 1,45 I_{\text{доп}}$.

Температуру нагрева токоведущей жилы проводника приближенно можно определить по выражению

$$\Theta_{\text{жс}} = \Theta_{\text{ос}} + (\Theta_{\text{жн}} - \Theta_{\text{он}}) \left(\frac{I_p}{I_{\text{доп}}} \right)^2 \quad (6.8)$$

где $\Theta_{\text{ос}}$ - фактическая температура окружающей среды, в которой расположены проводники;

$\Theta_{\text{жн}}$ - нормированная длительно допустимая температура нагрева жилы (для проводов и кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией напряжением до 1 кВ $\Theta_{\text{жн}} = 65^\circ \text{C}$);

$\Theta_{\text{он}}$ - нормированная температура окружающей среды (при прокладке проводников в воздухе $\Theta_{\text{он}} = 25^\circ \text{C}$).

Приняв, например, $\Theta_{\text{ос}} = 30^\circ \text{C}$ и коэффициент перегрузки по

току $\left(\frac{I_p}{I_{\text{доп}}} \right) = 1,3$, рассчитаем по формуле (6.8) возможное значение температуры нагрева проводников:

$$\Theta_{\text{жс}} = 30 + (65 - 25) \cdot 1,3^2 = 97,6^\circ \text{C}.$$

Как видим, полученное значение $\Theta_{\text{жс}} = 97,6^\circ \text{C}$ существенно больше длительно допустимой температуры $\Theta_{\text{жн}}$ для проводов и кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией, равной 65°C . От-

носительный тепловой износ изоляции определяется по выражению:

$$I = 2^{\frac{97,6-65}{8}} = 16,85 \approx 17$$

Следовательно, в приведенном примере автоматический выключатель допускает существенное повышение температуры нагрева токоведущих жил, которое приводит к ускорению относительного теплового износа изоляции примерно в 17 раз, что снижает надежность работы электрических сетей. Кроме того, могут быть созданы условия для возгорания в помещениях.

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что для исключения возможного превышения допустимой температуры проводников при перегрузках и КЗ номинальные токи защитных аппаратов по условию соответствия допустимому току проводника целесообразно выбирать несколько ниже, чем требуется в соответствии с [25]. Для автоматических выключателей номинальный ток теплового расцепителя рекомендуется выбирать из условия [45]

$$I_{\text{ном}} \geq 0,8 I_{\text{доп}}$$

Номинальные токи расцепителей автоматических выключателей следует выбирать по возможности минимальными по расчетным токам защищаемых участков сети.

При включении лампы с ЭПРА пусковой ток, способный вызвать длительную перегрузку проводников, отсутствует. Имеет место кратковременный зарядный ток, вызванный наличием конденсаторов в схеме ЭПРА. В сравнении со стандартным электромагнитным ПРА с компенсирующим конденсатором, зарядный ток в системе с ЭПРА выше. При выборе автоматических выключателей необходимо учитывать, что при первоначальном включении ЭПРА в сеть происходит очень быстрая зарядка накопительного конденсатора, входящего в состав конструкции ЭПРА. Максимальное время полной зарядки может достигать 500 микросекунд и зависит как от мощности ЭПРА, так и от индуктивности питающей сети. Форма кривой тока заряда соответствует спадающей экспоненте, амплитуда может достигать величины 70 А. Величина и длительность за-

рядного тока указывается в технической документации соответствующих типов ЭПРА.

Необходимо учитывать, что при включении ламп накаливания имеют место значительные пиковые токи, которые могут привести к срабатыванию устройств защиты. Поэтому аппараты защиты, установленные в щитках электрического освещения, должны быть отстроены от пусковых токов источников света.

У ламп накаливания пусковые токи обусловлены тем, что сопротивление вольфрамовой нити в холодном состоянии примерно в 15 раз меньше, чем в нагретом. Поэтому при включении ламп накаливания пиковый ток достигает пятнадцатикратного значения рабочего тока. Длительность пикового тока составляет примерно 0,06 с. За это время не срабатывает тепловая защита автоматов и не перегорают плавкие вставки предохранителей. Пиковые токи ламп накаливания необходимо учитывать при выборе некоторых типов автоматических выключателей с комбинированными расцепителями, чтобы исключить срабатывание токовой отсечки при включении световых приборов. Следовательно, при правильном выборе сечений проводников и аппаратов защиты лампы накаливания не оказывают существенного влияния на надежность электрических осветительных сетей.

Пусковые токи люминесцентных ламп низкого давления незначительны и кратковременны, что дает основание не учитывать их при расчете защиты осветительных сетей от сверхтока. В то же время пусковые токи ламп типа ДРЛ, ДРИ и ДНаТ следует принимать в расчет при выборе аппаратов защиты. Лампы типа ДРЛ и ДРИ имеют кратность пускового тока по отношению к номинальному 1,6. Однако стабилизация рабочего тока происходит примерно за 250с. Токовая отсечка автоматических выключателей на пиковый ток указанных ламп не реагирует.

В ряде случаев при расчете защиты приходится завышать на 20–40 % номинальные токи тепловых расцепителей автоматических выключателей и плавких вставок предохранителей, чтобы исключить их срабатывание при включении освещения. Для того чтобы убедиться в том, что защита отстроена от пиковых токов, необходимо воспользоваться защитными (времятоковыми) характеристиками автоматов и предохранителей.

Чтобы предотвратить ложное срабатывание электромагнитного расцепителя, рекомендуется применять автоматические выключатели с характеристикой мгновенного расцепления автомата типа *D*. Для данного типа кратность тока отсечки $K_{TO}=10-20$ и более. Отметим, что K_{TO} представляет собой отношение уставки срабатывания электромагнитного расцепителя к номинальному току теплового расцепителя автоматического выключателя.

6.5. Проверка сечений жил кабелей электрических сетей осветительных установок по термической стойкости

При проектировании электрических сетей освещения в Республике Беларусь расчет токов КЗ, как правило, не производится и проводники до

1 кВ на термическую стойкость не проверяются. Эта практика сложилась во времена СССР. Она базируется на действующих до настоящего времени в Республике Беларусь правилах устройства электроустановок (шестое издание) [25]. В соответствии с [25] проверку проводников напряжением до

1кВ на термическую стойкость к токам КЗ производить не требуется. Однако это противоречит стандарту [46], согласно которому в электрических сетях электроустановок зданий, выполненных кабелями, ограничивается время действия тока КЗ с целью недопущения опасного перегрева проводников.

В соответствии с требованиями [46] для КЗ продолжительностью до пяти секунд время t , в течение которого температура проводника возрастает от наибольшего допустимого значения в нормальном режиме до предельно допустимой температуры согласно [25], определяется по следующему выражению

$$\sqrt{t} = C \cdot \frac{F}{I_k} \quad (6.9)$$

где F - площадь поперечного сечения проводника, мм²;

I_k - действующее значение тока короткого замыкания, А;

C - расчетный коэффициент, зависящий от материала жил проводника и его изоляции, $A \cdot c^{0.5} / мм^2$.

Расчетный коэффициент C имеет следующие значения [46]:

115 А·с^{0,5}/мм² - для кабелей с медными жилами с поливинилхлоридной изоляцией, а также для соединений медных проводников, выполненных пайкой;

74 А·с^{0,5}/мм² - для кабелей с алюминиевыми жилами с поливинилхлоридной изоляцией;

135 А·с^{0,5}/мм² - для кабелей с медными жилами с резиновой изоляцией (в том числе с изоляцией из бутиловой и этиленпропиленовой резины) и с изоляцией из сшитого полиэтилена;

87 А·с^{0,5}/мм² - для кабелей с алюминиевыми жилами с резиновой изоляцией (в том числе с изоляцией из бутиловой и этиленпропиленовой резины) и с изоляцией из сшитого полиэтилена;

Из формулы (6.9) можно найти предельно допустимый ток короткого замыкания для кабеля по условию нагрева

$$I_k = \frac{C \cdot F}{\sqrt{t}}$$

а также минимальное сечение жил кабеля по термической стойкости

$$F = \frac{I_k \cdot \sqrt{t}}{C} \quad (6.10)$$

Формулу (6.10) можно представить в следующем виде:

$$F = \frac{\sqrt{I_k^2 \cdot t}}{C}$$

В [46] не указывается, по какому току КЗ, однофазному или трехфазному, следует выполнять проверку кабелей на термическую стойкость. Так как тепловой импульс тока короткого замыкания $B_k = I_k^2 \cdot t$, то тогда

$$F = \frac{\sqrt{B_k}}{C}$$

и, следовательно, расчет кабелей необходимо производить по току КЗ, обеспечивающему большее значение B_k .

Таким образом, в электрических сетях осветительных установок, выполненных кабелями с пластмассовой и резиновой изоляцией, необходимо выполнять расчет токов однофазного и трехфазного КЗ и проверять сечения жил кабелей на термическую стойкость.

Для упрощения проверки на термическую стойкость кабелей с пластмассовой и резиновой изоляцией при проектировании систем электрического освещения можно использовать специальные номограммы [47]. Для их применения необходимо знать значение тока КЗ и время отключения аппарата защиты, которое определяется по времятоковой характеристике автоматического выключателя.

Расчет токов КЗ в электрических сетях осветительных установок следует производить с учетом требований действующих нормативно-технических документов [48,49].

6.6. Выбор сечения проводников осветительных сетей по допустимой потере напряжения с учетом реактивного сопротивления

При проектировании осветительных установок выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения, как правило, производится без учета реактивной мощности и индуктивного сопротивления проводников. Такая проектная практика сложилась в тот период, когда для электрического освещения применялись в основном лампы накаливания, не потребляющие реактивную мощность. Естественно, в этом случае отсутствует реактивная составляющая потери напряжения, и расчет осветительной сети упрощается.

При использовании в осветительных установках газоразрядных ламп такой упрощенный метод дает определенную погрешность расчета, что в ряде случаев может привести к выбору заниженного сечения проводников электрической сети освещения.

В [7] отмечается, что расчет осветительных сетей без учета влияния индуктивного сопротивления проводников вызывает следующие погрешности при определении потерь напряжения:

- для групповых линий с коэффициентом мощности нагрузки 0,95, выполненных проводниками с площадью сечения до 6 мм^2 , – не более 2 %;
- для питающих линий с коэффициентом мощности нагрузки 0,95 при открытой прокладке проводников с площадью сечения до 50 мм^2 – не более 10 %.

Ниже изложена методика расчета сетей электрического освещения по допустимой потере напряжения с учетом реактивного сопротивления линий, в основу которой положены формулы, приведенные в [7, 20].

При расчете линий электрического освещения с несколькими нагрузками, подключенными в разных точках (например, групповых линий), выбор сечения проводников производится в предположении, что сеть однородная и коэффициент мощности нагрузок отдельных участков линии одинаков. В этом случае используется следующая формула для определения площади поперечного сечения проводов и жил кабелей:

$$F = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i\right) \cdot 10^5}{\gamma \cdot U_{ном}^2 \cdot (\Delta U_{дон} - \Delta U_{доп p})} , \quad (6.11)$$

где P_i и l_i - расчетная активная нагрузка, кВт, и длина, м, i -го участка линии;

n -количество участков линии;

γ - удельная проводимость материала жил проводников, м/(Ом·мм²);

$U_{ном}$ - номинальное напряжение линии, В;

$\Delta U_{доп}$ - допустимая потеря напряжения в осветительной сети, % [5,7];

$\Delta U_{доп p}$ - допустимая потеря напряжения, обусловленная реактивными нагрузками и сопротивлениями сети, %.

Составляющая потери напряжения, обусловленная реактивной нагрузкой и индуктивным сопротивлением линии, рассчитывается по выражению

$$\Delta U_{доп p} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i\right) \cdot tg\phi \cdot 10^5}{U_{ном}^2} \cdot X_0 ,$$

где $tg\phi$ - среднее значение коэффициента реактивной мощности осветительной нагрузки;

X_0 - предварительно принятое индуктивное сопротивление одной фазы линии, Ом/м.

Если приближенно оценить величину погонного индуктивного сопротивления затруднительно, то можно предварительно произвести выбор сечения токоведущих жил проводников по формуле (6.11) без учета $\Delta U_{доп p}$ и по справочным таблицам [5,7,20] принять соответствующее ему значение X_0 .

При расчете электрической сети по моментам нагрузок применяется следующая формула для выбора сечения проводников:

$$F = \frac{M}{C(\Delta U_{дон} - \Delta U_{доп p})} ,$$

где M - момент нагрузки, кВт·м, определяемый в соответствии с [5,7,20];

C - расчетный коэффициент, определяемый в зависимости от применяемых систем сети и рода тока [5].

Допустимая потеря напряжения, обусловленная реактивной нагрузкой и индуктивным сопротивлением сети, вычисляется по выражению

$$\Delta U_{доп p} = \frac{M \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot 10^5}{U_{ном}^2} \cdot X_0.$$

Допускается пренебрегать реактивным сопротивлением линий в следующих случаях [15]:

- при $\cos \phi = 0,9$ (в случае использования газоразрядных ламп с компенсацией реактивной мощности) в электрических сетях, выполненных кабелями, проводами в трубах или многожильными проводами с площадью сечения жилы из меди до 70 мм^2 , из алюминия – до 120 мм^2 , а при прокладке проводов на изолирующих опорах (изоляторах, роликах, клицах) – до сечения медного проводника 16 мм^2 , а алюминиевого – до 25 мм^2 включительно;

- при $\cos \phi = 0,5 - 0,6$ (в случае использования газоразрядных ламп без компенсации реактивной мощности) в электрических сетях, выполненными кабелями, проводами в трубах или многожильными проводами с площадью сечения жилы из меди до 16 мм^2 , из алюминия – до 25 мм^2 , а при прокладке проводов на изолирующих опорах (изоляторах, роликах, клицах) – до сечения медного проводника 6 мм^2 , а алюминиевого – до 10 мм^2 включительно.

В остальных случаях индуктивное сопротивление проводников линий должно учитываться. Для внутрицеховых сетей это целесообразно выполнять при проектировании питающих линий, прокладываемых открыто, и шинопроводов, когда по ним предполагается производить совместное питание силовых и осветительных электроприемников или когда осветительные сети предназначаются для питания газоразрядных ламп без устройств индивидуальной компенсации реактивной мощности [7].

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения с учетом реактивных нагрузок и индуктивных сопротивлений линий

способствует повышению надежности и эффективности работы электрических сетей осветительных установок.

6.7. Обеспечение эффективности осветительных установок в условиях эксплуатации

Для надежной и эффективной работы сетей электрического освещения большое значение имеет правильная эксплуатация осветительных установок. В процессе работы осветительные установки подвергаются воздействию окружающей среды, а также физическому износу, обусловленному в первую очередь теплотой, выделяемой электрическими источниками света, ПРА и другими элементами. Эксплуатация осветительных установок усложняется в помещениях с неблагоприятными условиями окружающей среды: пыльных, сырых, жарких, с химически активной или органической средой, пожароопасных и взрывоопасных, в которых необходимо особенно тщательно выполнять все регламентные работы. Обеспечение совместимости осветительных установок с условиями окружающей среды является важным вопросом не только проектирования, но и эксплуатации систем электрического освещения.

В процессе эксплуатации осветительных установок необходимо систематически производить их осмотр и техническое обслуживание. Периодичность выполнения регламентных работ должна соответствовать таблице 6.3 [50].

Таблица 6.3

Производимые операции, периодичность осмотра и технического обслуживания осветительных установок

| Операция | Периодичность выполнения операции |
|---|-----------------------------------|
| Проверка уровня освещенности в контрольных точках | Не реже 1 раза в год |
| Проверка исправности автоматических выключателей | 1 раз в 3 месяца |
| Проверка исправности системы аварийного освещения | Не реже 1 раза в квартал |

| | |
|---|----------------------|
| Проверка соответствия расцепителей автоматических выключателей и сечений проводников электрической сети | 1 раз в год |
| Испытание и измерение сопротивления изоляции проводников и заземляющих устройств | 1 раз в 3 года |
| Измерение нагрузок и уровней напряжения в отдельных точках электрической сети | 1 раз в год |
| Испытание изоляции стационарных трансформаторов с вторичным напряжением 12-42 В | Не реже 1 раза в год |

Перед проверкой уровня освещенности в помещениях следует очистить световые приборы от загрязнений (пыли, копоти и т.п.). При измерении освещенности люксметром необходимо учитывать индивидуальные особенности источников света.

В процессе эксплуатации осветительных установок с газоразрядными лампами могут выходить из строя конденсаторы компенсированных электромагнитных ПРА. Это приводит к снижению коэффициента мощности световых приборов, увеличению тока нагрузки и, следовательно, нагрева проводников и потерь электроэнергии в электрических сетях. Поэтому необходимо осуществлять регулярный контроль токовых нагрузок осветительных установок и производить замену отказавших конденсаторов.

Одним из условий рационального потребления электроэнергии является поддержание уровней напряжения в осветительной сети в допустимых пределах ($0,95-1,05 U_{ном.}$). При повышенном напряжении имеет место перерасход электроэнергии, повышенный тепловой износ изоляции и значительное уменьшение средней продолжительности горения ламп. Снижение напряжения приводит к уменьшению светового потока и потребляемой мощности источников света. В связи с этим актуальным вопросом эксплуатации осветительных установок является систематический контроль уровня напряжения, подводимого к световым приборам.

На многих промышленных предприятиях значение питающего напряжения в течение суток изменяется. В ночное время (основное время работы дежурного освещения и наружных осветительных установок) питающее напряжение может быть выше номинального на 5-10%. В этом случае потребляемая мощность световых приборов с электромагнитными ПРА увеличивается в соответствии с их статическими характеристиками (например, для ламп типа ДРЛ активная мощность увеличивается на 11-23%, а реактивная - на 17-36%), в то время как при использовании ЭПРА она остается практически неизменной.

Стандартные ЭПРА обеспечивают работу ламп в диапазоне напряжения питающей сети 175-260 В. При этом потребляемая мощность лампы автоматически регулируется в пределах $\pm 3\%$ или $\pm 5\%$ от её номинального значения в зависимости от модификации ЭПРА. Если напряжение питающей сети выходит за указанный выше диапазон, мощность лампы понижается до минимально возможного значения.

Отметим также, что применение ЭПРА продляет срок службы газоразрядной лампы. Это обусловлено отсутствием импульсов перезажигания, невозможностью возникновения выпрямительного эффекта, исключением повышения тока лампы при увеличении подведенного напряжения. При этом предотвращаются возможные перегрузки электрических сетей из-за увеличения тока световых приборов.

Таким образом, внедрение ЭПРА световых приборов с газоразрядными лампами высокого и низкого давления является эффективным мероприятием по повышению надежности и эффективности электрических сетей.

Для обеспечения надежной и эффективной работы электрических сетей систем электрического освещения в процессе эксплуатации следует поддерживать технические характеристики световых приборов, предусмотренные проектом электрооборудования. Световые приборы должны иметь ПРА, строго соответствующие номинальной мощности ламп. Включение ламп меньшей мощности в светильник, рассчитанный на большую мощность, приводит к резкому увеличению электропотребления комплекта «ПРА – лампа».

В качестве примера в таблицах 6.4 и 6.5 представлены результаты эксперимента, проведенного с металлогалогенной разрядной

лампой типа ДРИ мощностью 250 Вт напряжением 230 В с компенсированным ПРА. При установке ее светильник с ПРА, рассчитанным на мощность лампы 400 Вт (что конструктивно возможно), электропотребление светового прибора оказалось значительно выше, чем при использовании ее в светильнике с ПРА на 250 Вт.

Таблица 6.4

Характеристики электропотребления светового прибора с лампой типа ДРИ с номинальной мощностью 250 Вт и штатным ПРА

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности, (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| 207,1 | 0,900 | 1,06 | 214,4 | 42,2 | 218,5 | 0,981 |
| 213,0 | 0,926 | 1,09 | 228,5 | 46,3 | 233,1 | 0,980 |
| 218,8 | 0,951 | 1,13 | 242,0 | 50,8 | 247,3 | 0,978 |
| 224,2 | 0,975 | 1,16 | 252,7 | 58,4 | 259,4 | 0,974 |
| 229,0 | 0,996 | 1,19 | 264,0 | 72,5 | 273,8 | 0,964 |
| 236,2 | 1,027 | 1,25 | 281,3 | 90,3 | 295,4 | 0,952 |
| 241,4 | 1,050 | 1,29 | 293,2 | 102,4 | 310,6 | 0,944 |
| 247,5 | 1,076 | 1,34 | 308,2 | 121,5 | 331,3 | 0,930 |
| 254,0 | 1,104 | 1,38 | 323,0 | 138,6 | 351,5 | 0,919 |

Анализ информации, приведенной в таблицах 6.4 и 6.5, показывает, что при использовании лампы мощностью 250 Вт в светильнике с ПРА, рассчитанном на мощность лампы 400 Вт, ухудшаются все показатели электропотребления светового прибора, за исключением коэффициента мощности. По сравнению с использованием лампы с соответствующим ей ПРА, существенно увеличиваются значения потребляемых активной, реактивной и полной мощностей, а также тока. Это обусловлено большими потерями мощности в ПРА по отношению к мощности установленной лампы.

Таблица 6.5

Характеристики электропотребления светового прибора с лампой типа ДРИ с номинальной мощностью 250 Вт и ПРА, рассчитанном на мощность 400 Вт

| Подведенное напряжение, В | Отношение напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|----------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,0 | 0,900 | 1,58 | 317,4 | 79,3 | 372,2 | 0,970 |
| 213,0 | 0,926 | 1,63 | 337,8 | 84,3 | 348,2 | 0,970 |
| 218,0 | 0,948 | 1,67 | 352,8 | 91,0 | 364,3 | 0,968 |
| 221,0 | 0,961 | 1,72 | 368,0 | 97,5 | 380,7 | 0,967 |
| 224,2 | 0,975 | 1,75 | 379,0 | 104,9 | 393,2 | 0,964 |
| 230,5 | 1,002 | 1,79 | 397,0 | 115,9 | 413,6 | 0,960 |
| 235,8 | 1,025 | 1,86 | 418,0 | 130,6 | 437,9 | 0,954 |
| 241,0 | 1,048 | 1,92 | 439,0 | 146,3 | 462,7 | 0,949 |
| 247,7 | 1,077 | 1,98 | 463,2 | 164,3 | 491,5 | 0,942 |
| 253,5 | 1,102 | 2,19 | 483,1 | 180,1 | 515,6 | 0,937 |

В таблице 6.6 приведены данные, показывающие, как изменяются показатели электропотребления при использовании светового прибора при установке в него лампы меньшей мощности по отношению к номинальному потреблению (при соответствии лампы и ПРА и при номинальном напряжении). Особенно увеличивается потребление реактивной мощности при повышении напряжения до 253,5 В. В меньшей степени изменяется значение коэффициента мощности.

Таблица 6.6

Изменение показателей электропотребления комплекта
«ПРА – лампа» при использовании лампы
мощностью 250 Вт и ПРА на 400 Вт

| Показатель электропотребления | Номинальное значение | Значение показателя, %, при напряжении, В | |
|-------------------------------|----------------------|---|-------|
| | | 230 | 253,5 |
| Активная мощность, Вт | 264,0 | 150,3 | 183,0 |
| Реактивная мощность, квар | 72,5 | 159,7 | 248,4 |
| Полная мощность, В·А | 273,8 | 151,1 | 188,3 |
| Ток, А | 1,19 | 150,4 | 184,0 |
| Коэффициент мощности | 0,964 | 99,6 | 97,2 |

В заключение отметим, что замена газоразрядных ламп высокого давления на лампы меньшей мощности с целью экономии электроэнергии влечет за собой демонтаж старых и установку новых светильников, что связано с большими денежными и трудовыми затратами.

6.8. Повышение эффективности осветительных установок путем рационального управления световыми приборами

Устройства управления освещением должны обеспечивать удобство эксплуатации, минимальные затраты времени на включение (отключение) осветительной установки, максимальное использование естественного света с учетом режимов работы технологического оборудования производственного объекта.

В общем случае управление – это любое изменение состояния некоторого объекта, системы или процесса, ведущее к достижению поставленной цели. Применительно к системам электрического освещения под управлением понимается изменение состава, количества, потребляемой мощности и светотехнических характеристик световых приборов с целью адаптации их к применению в изме-

нившихся условиях функционирования. Управление освещением реализуется путем включения и выключения источников электрического освещения, а также регулирования уровня освещенности освещаемого объекта.

Системы управления электрическим освещением применяются для решения следующих основных задач:

- рациональное использование электроэнергии;
- повышение комфортности освещения;
- увеличение срока службы источников света благодаря меньшему времени их использования и исключению токовых перегрузок;
- повышение безопасности дорожного движения (для осветительных установок наружного освещения).

Системы управления дополнительно могут выполнять функции мониторинга, диагностики осветительных установок и устранения неисправностей за счет применения резервных световых приборов [32].

В зависимости от степени участия человека управление освещением может быть ручным, автоматизированным или автоматическим. Наиболее простым является ручное управление, при котором осуществляется воздействие на световые приборы с помощью выключателей, переключателей, кнопок и других средств коммутации. В случае автоматизированного управления используются магнитные пускатели, контакторы, автоматические устройства, микроконтроллеры и компьютерная техника с участием человека, принимающего решения в процессе управления и оказывающего некоторые управляющие воздействия вручную. При автоматическом управлении освещением участие человека полностью исключено.

В том случае, когда устройства управления расщелочены и располагаются в том же помещении (или в непосредственной близости от него), что и световые приборы, управление называется местным. При сосредоточенном размещении управляющих аппаратов (например, в щитке освещения), осуществляется централизованное управление осветительными установками всего помещения, цеха или здания. Дистанционное управление освещением большого числа объектов производится из одного места дежурным персоналом.

Проектируя электрическую сеть освещения любого здания или помещения, всегда приходится решать два важных вопроса: откуда

и с помощью каких устройств будет осуществляться управление освещением, а также как разбить принятые к установке световые приборы на самостоятельно управляемые группы. От решения этих вопросов зависят технико-экономические и эксплуатационные показатели системы электрического освещения.

Для энергосбережения важным является поддержание рационального режима эксплуатации осветительных установок, обеспечивающего включение искусственного освещения в тех местах, где это необходимо в требуемое время. Этому способствует оптимальное размещение световых приборов и рациональное построение осветительной сети с использованием аппаратов управления, выполняющих включение (отключение) требуемого количества светильников. Кроме обычных коммутационных аппаратов могут использоваться специальные приборы, регулирующие световой поток источника света в заданном диапазоне. При этом могут использоваться системы с ручным или автоматическим управлением в зависимости от уровня естественного освещения.

Существенной экономии электроэнергии, как на производстве, так и жилом секторе можно достичь, если автоматически управлять световыми приборами посредством специальных устройств, реагирующих на присутствие человека в помещениях общего пользования с редким пребыванием людей: коридорах, лестничных клетках, гардеробах цехов промышленных предприятий, санузлах и т.п. Энергосберегающий эффект при этом достигается за счет того, что электрическое освещение включается в тот период, когда оно необходимо, и выключается, когда в нем нет надобности. При этом для управления световыми приборами используют устройства управления, содержащие датчики движения (присутствия), реагирующие на прерывание светового или ультразвукового луча, на инфракрасное излучение, создаваемого человеком, или на шум. Например, может применяться выключатель, оснащенный оптическим датчиком и микрофоном. В светлое время суток освещение отключено. В случае снижения уровня естественной освещенности до установленного уровня, микрофон активируется и при возникновении в радиусе до пяти метров какого-то шума (звук шагов, открываемой двери и т.д.) освещение в помещении включается и горит некоторое время. Если сигнал на включение световых приборов в течение определенного времени не посылается или не изменяется, то датчики

дают команду на отключение освещения в контролируемом помещении.

Для управления наружными осветительными установками целесообразно применять автоматические программируемые реле времени или фотореле. Автоматическое управление наружным освещением путем использования автоматических фотоэлектрических программируемых устройств, включающих и отключающих световые приборы в зависимости от уровня естественной освещенности, уменьшает расход электроэнергии на освещение примерно на 20 %.

Для наружного освещения целесообразность автоматического управления можно считать не подвергающейся сомнению. В то же время для внутреннего освещения производственных зданий оно, как правило, ограничивается крупными цехами промышленных предприятий с одинаковыми условиями освещения по всей их площади. При устройстве автоматического управления для всего здания в целом может оказаться, что отдельные помещения будут в неравных условиях по освещению, или же потребуются усложнить схему управления, разделяя ее на части [18].

В процессе эксплуатации осветительных установок производственных и общественных зданий может применяться местное, централизованное, дистанционное, автоматизированное и автоматическое управление освещением. В отдельных помещениях зданий, как правило, используется один вид управления общим освещением. В то время в них, как и в зданиях, могут использоваться смешанные способы управления. Практически на любых промышленных объектах и в общественных зданиях для включения и выключения световых приборов всегда применяется местное управление, которое сочетается с другими видами управления освещением.

На производственных предприятиях сложные, многофункциональные системы автоматического управления освещением могут применяться при технико-экономическом обосновании. Их целесообразно использовать в качестве составной части общей системы телемеханизации и автоматизации управления системы электроснабжения промышленного предприятия.

Из существующих способов автоматического управления освещением программное управление пока признается более надежным. Однако нужно отметить, что управление с применением фотоавто-

матов является более гибким, так как учитывает не только время, но и уровень освещенности, зависящий от состояния погоды [18].

Для помещений площадью более 50 м² следует применять автоматические устройства регулирования искусственного освещения в зависимости от уровня естественной освещенности в помещении [32].

В учебных классах, актовых и спортивных залах, в конструкторских бюро, в рабочих кабинетах поликлиник и других учреждений здравоохранения следует предусматривать либо отключение световых приборов рядами, параллельными световым проемам, либо плавное или ступенчатое регулирования в зависимости от естественного освещения.

Электрическое освещение лестниц, холлов, коридоров общественных зданий должно иметь автоматическое или дистанционное управление, обеспечивающее отключение части световых приборов или ламп в ночное время.

Управление рабочим освещением в торговых залах площадью 300 м², в актовых залах, конференц-залах, обеденных залах столовых и ресторанов с числом рабочих мест более 300, вестибюлях и холлах гостиниц должно быть централизованным и дистанционным.

Для управления освещением лестниц, лифтовых холлов, вестибюлей, коридоров и других вспомогательных помещений жилых зданий, а также для местного управления рабочим освещением проходов и лестничных клеток общественных зданий рекомендуется использовать системы автоматического или автоматизированного управления, в том числе с датчиками присутствия [32].

Заключение

В работе произведен анализ структуры систем электрического освещения промышленных предприятий на основе схемы, представленной в виде графа. Рассмотрены особенности световых приборов как приемников электроэнергии, их основные характеристики и влияние на надежность и эффективность работы осветительных установок.

Получены аналитические зависимости, позволяющие приближенно определять фактическую температуру жилы проводника в зависимости от коэффициента предварительной нагрузки осветительной линии и температуры окружающей среды. Их использование позволяет оценивать относительный тепловой износ изоляции жил проводов и кабелей в процессе эксплуатации осветительных установок, что будет способствовать повышению надежности электрических осветительных сетей.

В светотехнике и электрическом освещении наиболее изучены эксплуатационные характеристики ламп накаливания, так как этот тип источника света является наиболее простым и имеет длительный период использования в осветительных установках производственных, коммунально-бытовых, сельскохозяйственных и др. объектов. Для газоразрядных источников света изменение продолжительности горения ламп в зависимости от величины отклонения напряжения оценивается приблизительно. В связи с этим проанализированы зависимости потребляемой активной мощности, светового потока и световой отдачи для разных источников света: ламп накаливания, люминесцентных ламп низкого давления и газоразрядных ламп высокого давления типов ДРЛ и ДРИ. В работе получены аналитические и графические зависимости, позволяющие оценивать, насколько изменяются эксплуатационные характеристики ламп при отклонении напряжения от номинального значения, что может использоваться на практике при оценке эффективности систем электрического освещения промышленных и коммунально-бытовых объектов. Анализ полученных зависимостей показывает, что в максимальной степени отклонение напряжения влияет на потребляемую мощность ламп типа ДРЛ, а также на световой поток и

световую отдачу ламп накаливания. В меньшей степени подведенное напряжение сказывается на световом потоке и световой отдаче люминесцентных ламп низкого давления. Световая отдача ламп типа ДРЛ практически не зависит от величины подведенного напряжения.

На надежность и эффективность работы электрических сетей осветительных установок в значительной мере оказывает влияние ток, протекающий по элементам сетей в нормальных и аномальных режимах. Превышение допустимого значения тока вызывает ускоренный тепловой износ изоляции проводников и отказы в работе электрических сетей. Величина потребляемой активной, реактивной и полной мощности, а также тока зависит от напряжения, подведенного к световым приборам. В работе выполнены экспериментальные исследования по определению указанных выше показателей электропотребления при разных значениях напряжения для ламп типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ, а также интегрированных и неинтегрированных компактных люминесцентных ламп.

Анализ полученных данных показывает, что по активной мощности наиболее чувствительны к изменению напряжения газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ. Лучшими показателями по потреблению активной мощности обладают компактные люминесцентные лампы и металлогалогенные лампы типа ДРИ. Наиболее широкий диапазон потребления реактивной мощности при изменении величины подведенного напряжения имеют световые приборы с лампами типа ДРИ и компенсированными ПРА. Светильники с лампами типа ДРИ и ДНаТ (в случае использования компенсированного ПРА) также существенно изменяют величину потребляемой реактивной мощности при отклонении напряжения от номинального значения. В лучшую сторону в этом отношении выделяются КЛЛ. При повышении напряжения в максимальной степени увеличивается ток комплекта «ПРА-лампа» при использовании ламп типа ДРЛ. Менее всего изменяется ток при применении компактных люминесцентных ламп. Отметим, что для ламп типа ДНаТ в случае применения компенсированного ПРА при изменении подведенного напряжения ток нагрузки варьируется в более широком диапазоне.

Для предотвращения превышения токовых нагрузок электрических сетей сверх допустимых значений и обеспечения надежности

их работы при использовании для освещения газоразрядных ламп высокого давления необходимо строго обеспечивать требуемые режимы напряжения. При питании силовых и осветительных нагрузок от одной трансформаторной подстанции напряжением 6-10/0,4 кВ это в первую очередь относится к периодам, когда снижаются силовые нагрузки и напряжение в электрической сети повышается.

Для оценки показателей электропотребления осветительных установок важно знать статические характеристики световых приборов с разными источниками света. Статические характеристики по напряжению для активной мощности ламп типа ДРЛ, ДРИ и ЛЛНД приводятся в разных литературных источниках. Однако имеющиеся данные несколько различаются и нуждаются в уточнении с учетом совершенствования технологии производства светотехнических изделий. Отсутствует такая информация для натриевых ламп типа ДНаТ, широко применяемых для освещения улиц и наружной территории промышленных объектов, и компактных люминесцентных ламп. Статические характеристики по реактивной мощности для газоразрядных ламп изучены недостаточно.

В работе на основе экспериментальных данных получены сглаживающие функции для оценки зависимости от напряжения, активной, реактивной и полной мощности, а также тока световых приборов с лампами типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ и компактных люминесцентных ламп. Полученные зависимости

могут быть использованы при проектировании и эксплуатации осветительных установок разнообразных производственных и коммунально-бытовых объектов.

Для повышения эффективности работы электрических сетей следует снижать уровень гармонических составляющих тока и напряжения, генерируемых световыми приборами с газоразрядными лампами. Для снижения тока высших гармоник и повышения коэффициента мощности газоразрядных ламп целесообразно применять его корректоры, входящие в состав ЭПРА. В осветительных установках могут использоваться также активные кондиционеры гармоник. Внедрение световых приборов на основе светодиодов позволит повысить качество напряжения в осветительных установках. Простейшим способом снижения уровня высших гармоник тока, генерируемых нелинейными нагрузками во внешнюю сеть, является последовательное включение линейных дросселей. В некоторых сетях

применение последовательно включенных линейных дросселей не позволяет уменьшить гармонические искажения кривой тока до желаемого результата. В этом случае целесообразно использовать пассивные индуктивно-емкостные LC -фильтры, настроенные на определенный порядок гармоник. В осветительных сетях с газоразрядными источниками света в первую очередь следует подавлять высшие гармоники тока 3, 5 и 7-го порядка.

Применение ЭПРА является действенным способом повышения эффективности осветительных установок и надежности электрических сетей. Для широкого внедрения ЭПРА в системах освещения промышленных предприятий в Республике Беларусь целесообразно наладить производство ЭПРА для газоразрядных ламп высокого давления.

Надежность электрических сетей можно повысить путем совершенствования выбора устройств защиты от сверхтоков. Для исключения возможного превышения допустимой температуры проводников при перегрузках и КЗ номинальные токи защитных аппаратов по условию соответствия допустимому току проводника целесообразно выбирать несколько ниже, чем требуется в соответствии с действующими нормативными документами. При выборе сечений проводников и аппаратов защиты необходимо выполнять расчет токов КЗ. Для этого целесообразно внести соответствующие изменения в существующие методики по расчету электрооборудования напряжением до 1 кВ.

Для эффективной работы сетей электрического освещения большое значение имеет правильная эксплуатация осветительных установок. Необходимо осуществлять регулярный контроль напряжения и токовых нагрузок в осветительных установках, производить замену отказавших конденсаторов компенсированных электромагнитных ПРА. В процессе эксплуатации следует поддерживать технические характеристики световых приборов, предусмотренные проектом электрооборудования. Световые приборы должны иметь ПРА, строго соответствующие номинальной мощности ламп. Включение ламп меньшей мощности в светильник, рассчитанный на большую мощность, приводит к резкому увеличению электропотребления комплекта «ПРА – лампа».

Как показали расчеты, применение светодиодных источников света в системе жилищно-коммунального хозяйства и на производ-

ственных объектах, даже при существующей стоимости светодиодов, является экономически и экологически целесообразным по сравнению с другими источниками света. Внедрение светодиодов становится одним из самых перспективных направлений на рынке световых приборов. Сейчас пятая часть всей мировой электроэнергии расходуется на освещение. Широкое применение светодиодных световых приборов позволит существенно сократить этот показатель.

Список использованных источников

1. Об энергосбережении: Закон Республики Беларусь, 15.07.1998г. №190-З: в ред. Закона Республики Беларусь от 20.07.2006. Нац. Центр правовой информации Республики Беларусь.-Минск, 2006.
2. Глушенков, О.Г. Энергоэффективная светотехника и системы управления наружным освещением / О.Г. Глушенков // Энергоэффективность. - 2013. - №4. - с.22-23.
3. Трофимов, Ю.В. Светодиоды: тенденция и проблемы внедрения / Ю.В. Трофимов, С.И. Лишик // Энергоэффективность. - 2013. - №4. - с.24-26.
4. ТКП 45-2.04-153-2009 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования – Минск: Министерство архитектуры и строительства, 2010. – 100 с.
5. Козловская, В. Б. Электрическое освещение: учебник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – Минск: Техноперспектива, 2011 – 543 с.
6. Рохлин, Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Рохлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 719 с.
7. Кнорринг, Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг, И.М. Фадин, В.Н. Сидоров. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.
8. Козловская, В.Б. Светодиоды как источники светового излучения / В.Б. Козловская [и др.] // Энергоэффективность. – 2009. – №4. – с. 12 – 14.
9. Козловская, В.Б. Перспективы применения источников света на основе светодиодов / Козловская В.Б. [и др.] // Энергоэффективность. – 2009. – №5. – с. 16 – 18.
10. А. Васильев, Журнал "Магазин свет" [www/magazin-svet.ru](http://www.magazin-svet.ru) - 26.08.2010г.
11. Журнал «Энергосбережение», www.abok.ru.
12. ТКП 45-2.02-22-2006 Здания и сооружения. Эвакуационные пути и выходы. Правила проектирования. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. – 47 с.

13. ТКП 45-4.04-149-2009 Системы электрооборудования жилых и общественных зданий. Правила проектирования. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 63с.

14. Пособие по расчету и проектированию естественного, искусственного и совмещенного освещения (к СНиП II-4-79) / НИИСФ. – М.: Стройиздат, 1985. – 384 с.

15. СН 357-77 Инструкция по проектированию силового и осветительного электрооборудования промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1977. – 96

16. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А.Е.Краснопольский, В.Б.Соколов, А.М.Троицкий; Под общ.ред. А.Е.Краснопольского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208с.

17. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.

18. Кнорринг, Г.М. Осветительные установки / Г.М. Кнорринг. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 288 с.

19. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Ю. Г. Барыбина, Л. Е. Федорова, М. Г. Зименкова, А. Г. Смирнова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.

20. Тульчин, И. К., Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И.К. Тульчин, Г.И.Нудлер.. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.

21. <http://www.гост-снп-рд.РФ/Data1/9/9693/index.htm>. - Пособие к «Указаниям по расчету электрических нагрузок» (вторая редакция). ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1993.

22. Глазунов, А.А. Электрические сети и системы / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.

23. Радкевич, В.Н. О допустимых нагрузках кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.Н. Радкевич, Р.В. Романов // Энергетика. Изв. ВУЗов и энергетических объединений СНГ. - 2006. - №3. - С.61- 66.

24. Бачелис, Д.С. Электрические кабели, провода и шнуры (справочник) / Д.С. Бачелис, Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян. – М.: «Энергия», 1971. – 704 с.

25. Правила устройства электроустановок. – 6-е издание переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.

26. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.

27. Будзко, И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко, М. С. Левин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.

28. Конюхова, Е. А. Электроснабжение объектов / Е. А. Конюхова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 320 с.

29. Стабровский, Л. Н. Новое направление в создании энергосберегающего электрооборудования / Л. Н. Стабровский // Энергия и менеджмент. – 2002. – № 1–2. – С. 14–17.

30. Азалиев, В. В. Эксплуатация осветительных установок промышленных предприятий / В. В. Азалиев, Г. Д. Варсанофьева, Ц. Е. Кроль. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 164 с.

31. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 357 с.

32. Айзенберг, Ю. Б. Справочная книга по светотехнике. – Москва, 2006. – 972 с.

33. ГОСТ 2239-79. Лапы накаливания общего назначения. Технические условия.

34. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.

35. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

36. Основы теории цепей: Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: «Энергия», 1975. – 752 с.

37. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

38. Козловская, В. Б. Применение светодиодов в освещении / В. Б. Козловская, Д. А. Гаврилович, О. Н. Перемотова // Главный энергетик. – 2009. – № 4. – с. 51 – 57.

39. Светодиодные светильники – 100 тысяч часов экономного света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – <http://svetopribor.by/article-69.html> – Дата доступа: 01. 03. 2010.

40. Кириленко, А.И. Светоизлучающие диоды - перспективные твердотельные источники света / А.И. Кириленко, С.Н. Чернявский // Энергия и Менеджмент. – 2004. – №3. – с.20 – 24.

41. Козловская, В.Б., Определение расхода электроэнергии на освещение промышленных предприятий / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, // Энергетика.– 2008.– №4. –с. 5– 11.

42. Постановление Министерства экономики Республики Беларусь от 31 августа 2005г. №158 «Об утверждении Правил по разработке бизнес планов инвестиционных проектов». – По состоянию на 30 марта 2007 года.

43. Козловская, В.Б. Эффективность применения светодиодных светильников в жилищно-коммунальном хозяйстве / В.Б. Козловская, Д.А. Гаврилович, О.Н. Перемотова. - Энергия и Менеджмент №1, 2011, стр. 24 – 29.

44. ОАО ”Лидский завод электроизделий”, серия ЛПБ/ЛББ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:– http://www.lidalighting.com.by/index.php? section_id=67 – Дата доступа: 01. 03.2010.

45. Фишман, В. Короткое замыкание в электропроводке. /В. Фишман. – Новости электротехники.- №1, 2007.

46. ГОСТ 30331.5-95 (МЭК 364-4-43-77). Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока.

47. Радкевич, В.Н. Выбор кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ по термической стойкости / В.Н. Радкевич, О.А. Скобля. – Главный энергетик, №6, 2009. - С.33-42.

48. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.

49. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания.

50. Сибикин, Ю.Д. Справочник молодого рабочего по эксплуатации электроустановок промышленных предприятий / Ю.Д. Сибикин. – М.: Высшая школа, 1992. – 176 с.

Приложение

Таблица П1

Характеристики электропотребления лампы типа ДРЛ
(номинальная мощность 125 Вт, напряжение 220 В,
некомпенсированный ПРА)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,0 | 0,941 | 0,98 | 119,1 | 163,5 | 202,3 | 0,588 |
| 212,8 | 0,967 | 1,03 | 127,6 | 178,9 | 219,7 | 0,581 |
| 218,3 | 0,993 | 1,11 | 137,7 | 199,4 | 242,3 | 0,568 |
| 220 | 1 | 1,12 | 139,5 | 202,5 | 245,9 | 0,567 |
| 224,6 | 1,021 | 1,18 | 147,2 | 220,5 | 265,1 | 0,555 |
| 230 | 1,045 | 1,23 | 155,0 | 236,7 | 282,9 | 0,548 |
| 234,7 | 1,067 | 1,27 | 162,0 | 250,0 | 298,0 | 0,543 |
| 241,6 | 1,098 | 1,34 | 172,0 | 275,0 | 324,4 | 0,530 |
| 247,5 | 1,125 | 1,40 | 181,7 | 294,0 | 345,6 | 0,526 |
| 253,0 | 1,15 | 1,46 | 191,0 | 316,0 | 365,3 | 0,517 |

Таблица П2

Характеристики электропотребления лампы типа ДРИ
(номинальная мощность 250 Вт, напряжение 230 В,
компенсированный ПРА)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,1 | 0,900 | 1,06 | 214,4 | 42,2 | 218,5 | 0,981 |
| 213,0 | 0,926 | 1,09 | 228,5 | 46,3 | 233,1 | 0,980 |
| 218,8 | 0,951 | 1,13 | 242,0 | 50,8 | 247,3 | 0,978 |
| 224,2 | 0,975 | 1,16 | 252,7 | 58,4 | 259,4 | 0,974 |
| 229,0 | 0,996 | 1,19 | 264,0 | 72,5 | 273,8 | 0,964 |
| 236,2 | 1,027 | 1,25 | 281,3 | 90,3 | 295,4 | 0,952 |
| 241,4 | 1,050 | 1,29 | 293,2 | 102,4 | 310,6 | 0,944 |
| 247,5 | 1,076 | 1,34 | 308,2 | 121,5 | 331,3 | 0,930 |
| 254,0 | 1,104 | 1,38 | 323,0 | 138,6 | 351,5 | 0,919 |

Таблица ПЗ

Характеристики электропотребления лампы типа ДНаТ
(номинальная мощность 250 Вт, напряжение 220 В,
некомпенсированный ПРА)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,8 | 0,944 | 2,59 | 234,5 | 484,1 | 537,9 | 0,436 |
| 212,8 | 0,967 | 2,64 | 247,0 | 505,7 | 562,8 | 0,439 |
| 218,2 | 0,992 | 2,68 | 263,1 | 523,5 | 585,9 | 0,449 |
| 220 | 1 | 2,69 | 270,0 | 527,3 | 592,4 | 0,456 |
| 224,8 | 1,022 | 2,72 | 279,4 | 543,8 | 611,4 | 0,457 |
| 227,0 | 1,032 | 2,78 | 289,0 | 560,0 | 630,1 | 0,459 |
| 230,0 | 1,045 | 2,83 | 299,7 | 578,6 | 651,6 | 0,460 |
| 235,6 | 1,071 | 2,89 | 314,5 | 603,7 | 680,7 | 0,462 |
| 241,3 | 1,097 | 2,95 | 329,3 | 631,2 | 711,9 | 0,463 |
| 247,1 | 1,123 | 3,00 | 349,0 | 655,4 | 742,5 | 0,470 |
| 253,9 | 1,154 | 3,03 | 372,6 | 672,8 | 769,1 | 0,484 |

Таблица П4

Характеристики электропотребления лампы типа ДНаТ
(номинальная мощность 150 Вт, напряжение 230 В,
компенсированный ПРА)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,0 | 0,9 | 0,66 | 130,9 | 36,3 | 135,8 | 0,964 |
| 212,2 | 0,923 | 0,67 | 136,9 | 38,5 | 142,2 | 0,963 |
| 218,3 | 0,949 | 0,72 | 150,7 | 42,2 | 156,5 | 0,963 |
| 224,5 | 0,976 | 0,73 | 156,9 | 45,6 | 163,4 | 0,960 |
| 230,8 | 1,003 | 0,76 | 167,1 | 51,6 | 174,9 | 0,955 |
| 233,0 | 1,013 | 0,77 | 172,5 | 51,8 | 180,1 | 0,958 |
| 235,6 | 1,024 | 0,78 | 176,5 | 53,2 | 184,3 | 0,958 |
| 241,2 | 1,049 | 0,81 | 186,5 | 60,3 | 196,0 | 0,952 |
| 247,7 | 1,077 | 0,85 | 199,3 | 69,0 | 210,9 | 0,945 |
| 253,0 | 1,1 | 0,89 | 210,9 | 79,8 | 225,5 | 0,935 |

Таблица П5

Характеристики электропотребления компактной интегрированной люминесцентной лампы типа Т3 3U 15 W/840 (номинальная мощность 15 Вт, напряжение 220-240 В)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 206,3 | 0,897 | 0,117 | 13,30 | 20,25 | 24,23 | 0,549 |
| 212,8 | 0,925 | 0,117 | 13,65 | 20,82 | 24,90 | 0,548 |
| 217,5 | 0,946 | 0,117 | 13,92 | 21,22 | 25,38 | 0,548 |
| 224,0 | 0,974 | 0,117 | 14,30 | 21,92 | 26,21 | 0,546 |
| 230,3 | 1,001 | 0,117 | 14,76 | 22,79 | 27,15 | 0,544 |
| 234,7 | 1,020 | 0,118 | 15,04 | 23,32 | 27,75 | 0,542 |
| 241,0 | 1,049 | 0,120 | 15,66 | 24,42 | 29,01 | 0,540 |
| 248,0 | 1,078 | 0,120 | 16,05 | 25,20 | 29,88 | 0,537 |
| 254,0 | 1,104 | 0,121 | 16,48 | 25,94 | 30,73 | 0,536 |

Таблица П6

Характеристики электропотребления компактной люминесцентной лампы (номинальная мощность 11 Вт, напряжение 220 В)

| Подведенное напряжение, В | Относительное напряжение | Ток, А | Активная мощность, Вт | Реактивная мощность, вар | Полная мощность, В·А | Коэффициент мощности (cosφ) |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 207,0 | 0,941 | 0,113 | 11,63 | 20,45 | 23,53 | 0,494 |
| 212,6 | 0,966 | 0,114 | 12,0 | 21,09 | 24,26 | 0,495 |
| 218,4 | 0,993 | 0,115 | 12,26 | 21,90 | 25,10 | 0,488 |
| 224,1 | 1,019 | 0,115 | 12,63 | 22,56 | 25,85 | 0,488 |
| 230,7 | 1,049 | 0,116 | 12,96 | 23,30 | 26,67 | 0,486 |
| 236,8 | 1,076 | 0,117 | 13,47 | 24,20 | 27,70 | 0,486 |
| 241,7 | 1,099 | 0,117 | 13,63 | 24,82 | 28,31 | 0,481 |
| 247,9 | 1,127 | 0,119 | 14,10 | 25,83 | 29,43 | 0,479 |
| 252,8 | 1,149 | 0,119 | 14,40 | 26,49 | 30,15 | 0,478 |

Научное издание

АНИЩЕНКО Вадим Андреевич
КОЗЛОВСКАЯ Влада Борисовна
РАДКЕВИЧ Владимир Николаевич
КОЛОСОВА Ирина Владимировна

**ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

Технический редактор *О.В. Песенько*

Подписано в печать 29.09.2014. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 12,67. Уч.-изд. л. 9,91. Тираж 100. Заказ 284.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.