

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-289-300

УДК 621.32 (075.8)

Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей

В. Н. Радкевич¹⁾, Я. В. Михайлова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Исследованы показатели электропотребления световых приборов на основе светодиодов в зависимости от подведенного напряжения. Для светильника и прожектора со светодиодами экспериментально определялись активная и реактивная мощности, ток и коэффициент мощности в функции напряжения, величина которого изменялась в диапазоне 200–245 В. Анализ экспериментальных данных показал, что благодаря применяемым драйверам в указанном диапазоне напряжения потребляемая световыми приборами активная мощность остается практически неизменной. Реактивная мощность светодиодных приборов зависит от подведенного напряжения и носит емкостный характер. В отличие от газоразрядных источников света исследованные светодиодные приборы не потребляют, а генерируют реактивную мощность. С изменением подведенного напряжения от 200 до 245 В генерируемая реактивная мощность увеличивается на 60 % у прожектора и на 50 % – у светильника. При этом светодиодный прожектор имеет низкие значения коэффициента активной мощности. Ток, потребляемый прожектором, возрастает на 22 %, а светильника – на 13 %. Получены формулы для определения предельного значения длины расчетного участка однофазной групповой линии с учетом конкретных исходных данных. Светодиодные источники света, как правило, питаются по однофазным групповым линиям. Количество ламп, подключаемых к однофазным линиям, регламентируется нормативными документами. С учетом этого и небольшой мощности светодиодных источников света однофазные групповые линии обычно выполняются проводниками, имеющими минимально возможное сечение. Для них определены предельные значения длины расчетного участка, соответствующие заданной потере напряжения в линии при температуре окружающей среды от 15 до 60 °С. Расчеты показали, что для групповых линий, питающих светодиодные световые приборы, выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения не имеет определяющего значения. Определяющим при выборе сечений жил проводников групповых электрических сетей является расчет по допустимому нагреву с учетом температуры окружающей среды.

Ключевые слова: светодиоды, световые приборы, электропотребление, реактивная мощность, напряжение, сечение проводника

Для цитирования: Радкевич, В. Н. Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей / В. Н. Радкевич, Я. В. Михайлова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 289–300

Адрес для переписки

Радкевич Владимир Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Radkevich Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Specific Features of Power Consumption of LED Devices and Accounting them in Calculation of Electrical Networks

V. N. Radkevich¹⁾, Ya. V. Michailova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The indicators of power consumption of lighting devices based on LEDs are studied depending on the supplied voltage. For the lamp and floodlight with LEDs active and reactive power, current and power factor as a function of voltage (which value changed in the range 200–245 V) were experimentally determined. The analysis of experimental data demonstrated that due to the drivers in the specified voltage range the active power consumed by light devices remains practically unchanged. The reactive power of LED devices depends on the supplied voltage and is capacitive in its nature. In contrast with gas-discharge light sources the LED devices under study do not consume reactive power, but generate it. With the change of the supplied voltage from 200 to 245 V the value of the generated reactive power increases to 60 % for the floodlight and 50 % for the lamp. The LED floodlight has a low coefficient of active power. The current consumed by the floodlight has increased by 22 %, and by the lamp – by 13 %. The formulas for determining the maximum value of the length of the calculated section of single-phase group lines were developed, taking into account specific source data. LED light sources tend to feed by electric power by single-phase group lines. The number of lamps connected to single-phase lines is regulated by normative documents. Bearing this in mind as well as the small power of LED sources single-phase group lines are usually performed with conductors of the smallest possible cross section. The limit values of the length of the calculated section that correspond to a predetermined loss of voltage in line with ambient temperature from 15 to 60 °C were determined for them. The calculations demonstrated that for group lines that feed the LEDs, the choice of conductor cross-sections in accordance with permissible voltage loss is not critical. The determinant factor for the choice of the cross-section of the conductors of group electrical networks is the calculation of acceptable heat with respect to temperature of the environment.

Keywords: LEDs, lighting fixtures, power consumption, reactive power, voltage, section of the conductor

For citation: Radkevich V. N., Michailova Ya. V. (2016) Specific Features of Power Consumption of LED Devices and Accounting them in Calculation of Electrical Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 289–300 (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь в осветительных установках промышленных предприятий и коммунально-бытовых объектов применяются светодиодные источники света, характеризующиеся высокой светоотдачей и сроком службы, значительно превышающим время горения газоразрядных ламп. При использовании светодиодного освещения снижаются расход электроэнергии, потери в электрических сетях, а также затраты на сооружение электрических осветительных установок (меньшие затраты на провода, кабели, электрические аппараты и т. д.) [1, 2]. Внедрение источников света должно сопровождаться светотехническими и электрическими расчетами на основе действующих нормативно-технических документов и руководящих технических материалов [3–5]. Однако в них вопросам проектирования и использования светодиодного освещения уделено недостаточно вни-

мания. В технической литературе отсутствуют рекомендации и справочные данные, необходимые для выполнения светотехнических и электрических расчетов осветительных установок, в которых применяются светодиодные световые приборы. Поэтому указанные расчеты выполняются методами, разработанными для установок с газоразрядными лампами. В то же время светодиодные световые приборы имеют свои особенности, учет которых может повлиять на результаты расчета.

Светодиодные световые приборы в своем составе, помимо светодиодов, имеют драйверы (преобразователи, источники питания), предназначенные для питания и управления работой как отдельных светодиодов, так и их групп. Для выполнения электрического расчета осветительной сети необходимо знать потребляемую мощность светового прибора и его коэффициент мощности $\cos\varphi$ в зависимости от подведенного к его зажимам напряжения. Производители светодиодных световых приборов в технической документации дают минимальную информацию о показателях их электропотребления. Как правило, отсутствуют данные по драйверам. В паспортах и на упаковках световых приборов и ламп обычно указываются лишь их основные технические характеристики и срок службы. В связи с этим исследование показателей электропотребления световых приборов на основе светодиодов представляет определенный интерес.

Основная часть

В электрических сетях переменного тока световые приборы с газоразрядными лампами потребляют активную и реактивную мощность. Активная мощность необходима для создания дугового разряда, требуемого для светового излучения. Реактивная мощность имеет место при наличии в приборах элементов, обладающих индуктивностью и электрической емкостью. Эта мощность оказывает существенное влияние на режим напряжения в осветительных сетях. В общем случае реактивная мощность может быть представлена как

$$Q = Q_L - Q_C, \quad (1)$$

где Q_L – мощность, потребляемая элементами с индуктивностью, вар; Q_C – то же, генерируемая элементами, обладающими емкостью, вар.

В газоразрядных световых приборах обычно преобладает индуктивная составляющая Q_L , вследствие чего они потребляют реактивную мощность. Для выполнения расчетов электрических осветительных сетей со светодиодными световыми приборами необходимо знать их показатели электропотребления. При этом представляет интерес реактивная мощность, возникающая из-за наличия в них драйверов.

Показатели электропотребления световых приборов зависят от подведенного напряжения, величина которого в точках подключения световых

приборов к электрической сети может отличаться от номинального значения. В технической литературе нет информации о статических характеристиках активной и реактивной мощности по напряжению для светодиодных световых приборов. В связи с этим выполнены экспериментальные исследования зависимости от напряжения U следующих показателей электропотребления некоторых световых приборов со светодиодными источниками света:

- потребляемого тока I ;
- активной потребляемой мощности P ;
- реактивной мощности Q ;
- коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Исследования проводили для светодиодного прожектора типа Kanlux PACO LED45-W и светильника типа L-school 16/1500/Д, основные технические данные которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные светодиодных световых приборов

Certificate data of LED lighting devices

Основная техническая характеристика	Тип светового прибора	
	L-school 16/1500/Д	Kanlux PACO LED45-W
Напряжение питания, В	140–265	220–240
Частота, Гц	50; 60	50; 60
Рабочий ток светодиодов, мА	150	–
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	$\geq 0,95$	–
Потребляемая мощность, Вт	≤ 16	4

Измерения показателей электропотребления проводили на лабораторной установке, в которой основным измерительным прибором являлся трехфазный многофункциональный электронный счетчик типа СС-301 (Гран-Электро). Класс точности счетчика по активной энергии – 1 (по СТБ ГОСТ Р 52322–2007), по реактивной энергии – 1 (СТБ ГОСТ Р 52425–2007). Счетчик СС-301, кроме учета активной и реактивной энергии, измеряет подведенное напряжение, активную и реактивную мощности, ток и коэффициент активной мощности $\cos\varphi$. В процессе измерений фиксировали технические характеристики всего комплекта «драйвер – светодиоды». Результаты измерений приведены в табл. 2, 3.

Полученные экспериментальные данные имеют невысокую точность главным образом из-за сложности отсчета небольших величин с помощью электрического счетчика. Однако у них есть приемлемая согласованность измеренных показателей, позволяющая произвести качественную оценку характеристик электропотребления светодиодных приборов.

Таблица 2

**Характеристики электропотребления светодиодного прожектора
типа Kanlux PACO LED45-W**

**Specific features of power consumption of the LED floodlight
of the Kanlux PACO LED45-W type**

Подведенное напряжение, В	Ток, А	Активная мощность, Вт	Реактивная мощность, вар	Коэффициент мощности cosφ
200,0	0,09	5,00	–15,00	0,29
205,0	0,09	5,00	–16,00	0,27
211,0	0,09	5,00	–17,00	0,26
215,9	0,10	5,00	–18,00	0,25
220,0	0,10	5,00	–19,00	0,25
225,0	0,10	5,00	–20,00	0,24
230,0	0,11	5,00	–23,00	0,22
235,7	0,11	5,00	–23,00	0,22
240,0	0,11	5,00	–23,00	0,22
245,0	0,11	5,00	–24,00	0,22

Таблица 3

**Характеристики электропотребления светодиодного светильника
типа L-school 16/1500/Д**

**Specific features of power consumption of the LED lamp
of the L 16/1500 school/D type**

Подведенное напряжение, В	Ток, А	Активная мощность, Вт	Реактивная мощность, вар	Коэффициент мощности cosφ
200,0	0,085	15,5	–5,00	0,95
210,0	0,082	15,5	–5,50	0,95
220,0	0,080	15,5	–5,50	0,95
225,0	0,079	16,0	–6,00	0,95
230,0	0,078	16,0	–6,50	0,95
235,0	0,078	16,0	–6,50	0,95
240,0	0,075	16,0	–7,50	0,95
245,0	0,075	16,0	–7,50	0,95

Измерения показали, что у прожектора фактическое потребление активной мощности (5 Вт) больше паспортного (4 Вт) на 25 %. Анализ полученных результатов демонстрирует, что благодаря применяемым драйверам изменение подведенного фазного напряжения в диапазоне 200–245 В практически не влияет на потребление активной мощности световыми приборами. Совершенно иной режим реактивной мощности – исследуемые приборы освещения ее не потребляли, а генерировали. Однако это не было указано в паспорте световых приборов. При этом с изменением напряжения от 200 до 245 В генерируемая реактивная мощность увеличивалась на 60 % у прожектора и на 50 % – у светильника. Отметим, что светодиодные световые приборы сохраняли работоспособность и при больших отклонениях напряжения на их зажимах.

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ светильника типа L-school 16/1500/Д практически не изменялся и соответствовал численному значению, заявленному в паспорте прибора, но при токе, опережающем напряжение на угол φ . Выявленное обстоятельство необходимо учитывать при расчете режимов напряжения в электрических сетях осветительных установок.

Прожектор типа Kanlux PACO LED45-W имеет низкий коэффициент мощности $\cos\varphi$, который при росте напряжения снижается, а значит, увеличивается коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi$. Так как реактивная мощность

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (2)$$

то увеличение $\operatorname{tg}\varphi$ влечет за собой рост величины Q , генерируемой драйвером.

Надежность и эффективность работы электрических сетей осветительных установок в значительной степени зависят от тока нагрузки, 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.

Как видно из табл. 2 и 3, при изменении подведенного напряжения в диапазоне 200–245 В ток, потребляемый прожектором, возрастает на 22 %, а светильника – снижается на 13 %. Увеличение тока прожектора обусловлено существенным возрастанием величины генерируемой реактивной мощности при повышении напряжения. У светильника коррекция коэффициента мощности драйвером более эффективная. Она обеспечивает высокий $\cos\varphi$ и незначительную реактивную мощность. Так как однофазный ток

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}, \quad (3)$$

то при одном и том же значении активной мощности P повышение напряжения U приводит к уменьшению тока светового прибора.

Линии электрического освещения могут питать сосредоточенную и распределенную нагрузку световых приборов. К первым относятся питающие и распределительные линии, питающие осветительные щитки (ОЩ), а ко вторым – групповые, к которым подключаются светильники (рис. 1).

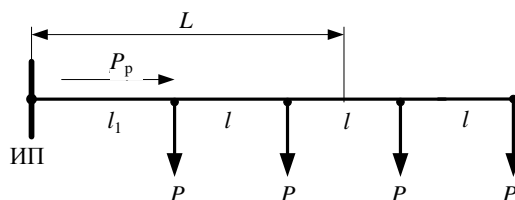


Рис. 1. Схема групповой линии электрического освещения с равномерно распределенной нагрузкой: ИП – источник питания (ОЩ)

Fig. 1. The pattern of a group line of electric lighting with evenly distributed load:
IP – power supply

Групповая линия состоит из нескольких участков с одинаковым сечением проводников. Участки имеют разные токи нагрузки и, следовательно, неодинаковую температуру нагрева токопроводящих жил проводов и кабелей. Максимальный ток нагрузки имеет головной (первый) участок, минимальный – последний. Сечение проводников определяется по расчетной нагрузке P_p головного участка

$$P_p = \sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность i -го светового прибора, кВт; n – количество световых приборов, присоединенных к линии, шт.

Осветительная сеть должна работать в длительно допустимом тепловом режиме и обеспечивать требуемое качество напряжения, подведенного к зажимам световых приборов. Выбор сечений проводников по допустимому нагреву производится согласно [2, 6, 7] с учетом фактической температуры окружающей среды Θ_c . Для осветительных электрических сетей, прокладываемых в воздухе, условная температура окружающей среды $\Theta_{\text{сн}} = 25^\circ\text{C}$ [7]. Значение расчетной (фактической) температуры Θ_c зависит от производственных условий. Например, в горячих цехах металлургических заводов температура воздуха может достигать $50\text{--}55^\circ\text{C}$. Осветительные сети, располагаемые сверху помещений, по условиям охлаждения находятся в худших условиях по сравнению с силовыми сетями, что целесообразно учитывать при выполнении расчетов осветительных установок.

В Республике Беларусь в настоящее время нет нормативно-технических документов и методик, предназначенных для использования при расчете осветительных установок со светодиодными световыми приборами. Поэтому будем руководствоваться документацией, регламентирующей проектирование освещения с традиционными источниками света.

Согласно [4, 5] каждая групповая линия, как правило, должна содержать на фазу не более 20 ламп (накаливания, газоразрядных). Тогда для групповой линии, питающей 20 светильников со светодиодными лампами с номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 0,06$ кВт, в соответствии с формулой (4) расчетная нагрузка линии $P_p = 0,06 \cdot 20 = 1,2$ кВт. При номинальном напряжении сети $U_{\text{ном}} = 230$ В и $\cos\varphi = 0,95$ расчетный ток линии $I_p = 5,5$ А. Для питания светодиодных световых приборов малой мощности, как правило, применяются однофазные групповые линии [8], выполненные проводниками, имеющими сечения, минимально допустимые по механической прочности: $1,5\text{ мм}^2$ – для проводов и кабелей с медными жилами; $2,5\text{ мм}^2$ – с алюминиевыми [9]. Они имеют длительные допустимые по нагреву токи $I_{\text{доп}}$, выдерживающие I_p групповой светодиодной линии даже при $\Theta_c = 55^\circ\text{C}$.

По допустимой потере напряжения сечения проводников, как правило, рассчитываются без учета реактивных нагрузок и индуктивных сопротив-

лений электрических сетей. В этом случае площадь сечения проводников групповой осветительной линии (мм^2) определяется по выражению [2, 6]

$$F = \frac{P_p L}{\Delta U_{\text{доп}} C}, \quad (5)$$

где L – длина расчетного участка линии, м; $\Delta U_{\text{доп}}$ – допустимая потеря напряжения в линии, %; C – расчетный коэффициент, $\text{В}^2 \cdot \text{м} / (\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$.

При расчете групповой линии равномерно распределенная нагрузка световых приборов заменяется суммарной сосредоточенной, приложенной в середине участка между первым и последним световыми приборами. В этом случае при одинаковых расстояниях между точками подключения соседних световых приборов длина расчетного участка вычисляется по формуле

$$L = l_1 + l(N_R - 1)/2, \quad (6)$$

где l_1 – длина участка линии от осветительного щитка до первого прибора, м; l – расстояние между соседними световыми приборами в ряду, м; N_R – количество световых приборов в одном ряду, шт.

Численное значение C зависит от материала проводника, номинального напряжения линии, рода тока и системы сети. Для однофазной линии переменного тока данный коэффициент определяется по формуле

$$C = \frac{\gamma_p U_{\text{ном.ф}}^2}{2} \cdot 10^{-5}, \quad (7)$$

где $U_{\text{ном.ф}}$ – номинальное фазное напряжение линии, В; γ_p – удельная проводимость проводникового материала, $\text{м} / (\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$, при расчетной температуре Θ_p .

Значения коэффициента C приводятся в [2, 6, 10] для удельной проводимости меди и алюминия при расчетной температуре Θ_p . В то же время фактическая температура нагрева жилы Θ может отличаться от расчетной Θ_p , что оказывает влияние на выбранное сечение проводников. Более точно площадь сечения токопроводящих жил можно определить, используя удельную проводимость проводникового материала при действительной температуре нагрева жил Θ , которую можно найти по выражению

$$\gamma_{\Theta} = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha(\Theta - 20)}, \quad (8)$$

где γ_{Θ} – удельная проводимость при температуре 20°C , $\text{м} / (\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, который для меди и алюминия равен $0,004 \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Значение γ_{Θ} для меди составляет 55,56, а для алюминия 33,90 м/(Ом·мм²) [6]. Для осветительных электрических сетей, работающих с мало изменяющейся во времени нагрузкой, температура нагрева жил проводников может быть приближенно найдена по формуле [10]

$$\Theta = (\Theta_{\text{жн}} - \Theta_{\text{сн}})(I_{\text{р}} / I_{\text{доп}})^2 + \Theta_{\text{с}}. \quad (9)$$

С учетом изложенного более точно площадь сечения проводов или жил кабеля можно найти по формуле

$$F = \frac{2P_{\text{р}}L}{\Delta U_{\text{доп}} \gamma_{\Theta} U_{\text{ном.ф}}^2} \cdot 10^5. \quad (10)$$

Из (10) получим предельное значение L при конкретных исходных данных

$$L = \frac{F \Delta U_{\text{доп}} \gamma_{\Theta} U_{\text{ном.ф}}^2}{2P_{\text{р}}} \cdot 10^{-5}. \quad (11)$$

С учетом (8) формулу (11) представим в следующем виде:

$$L = \frac{F \Delta U_{\text{доп}} \gamma_{\Theta} U_{\text{ном.ф}}^2}{2P_{\text{р}} (1 + \alpha(\Theta - 20))} \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Полученное выражение позволяет определять предельную длину расчетного участка групповой линии, питающей световые приборы, в зависимости от ее параметров и расчетной температуры нагрева жил проводников.

Максимально допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\text{доп.с}}$ в осветительных сетях зависит от технических параметров силового трансформатора, его коэффициента загрузки $\beta_{\text{т}}$ и коэффициента мощности $\cos \varphi$ нагрузки. Например, для масляного трансформатора мощностью 1000 кВ·А при $\beta_{\text{т}} = 0,7$ и $\cos \varphi = 0,9$ значение $\Delta U_{\text{доп.с}} = 7,6$ %. Большая часть $\Delta U_{\text{доп.с}}$ относится к питающим и распределительным линиям. Допустимая потеря напряжения в групповых линиях, как правило, составляет 1,5–2,0 %.

Произведем расчеты L по формуле (12) при $\Delta U_{\text{доп}} = 1,5$ и 2,0 % и температуре окружающей среды $\Theta_{\text{с}} = 15$ –60 °С. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Из представленных на рис. 2, 3 графических зависимостей $L = f(\Theta)$ видно, что при минимально допустимых сечениях токопроводящих жил алюминиевые проводники имеют большие значения L по сравнению с медными.

Таблица 4

Предельные значения длины расчетного участка групповой линии

The limit values of the length of the calculated section a group line

$\Theta_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	Материал жилы – медь			$\Theta_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	Материал жилы – алюминий		
	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$\Delta U_{\text{доп}} = 1,5 \%$	$\Delta U_{\text{доп}} = 2,0 \%$		$\Theta, ^\circ\text{C}$	$\Delta U_{\text{доп}} = 1,5 \%$	$\Delta U_{\text{доп}} = 2,0 \%$
		$L, \text{ м}$				$L, \text{ м}$	
15	18,35	27,7	37,0	15	17,74	28,3	37,7
20	23,35	27,2	36,3	20	22,74	27,7	37,0
25	28,35	26,7	35,6	25	27,74	27,2	36,2
30	33,35	26,2	34,9	30	32,74	26,7	35,6
35	38,35	25,7	34,2	35	37,74	26,2	34,9
40	43,35	25,2	33,6	40	42,74	25,7	34,2
45	48,35	24,8	33,0	45	47,74	25,2	33,6
50	53,35	24,3	32,4	50	52,74	24,8	33,0
55	58,35	23,9	31,9	55	57,74	24,3	32,5
60	63,35	23,5	31,3	60	62,74	23,9	31,9

Результаты расчета иллюстрируют рис. 2, 3.

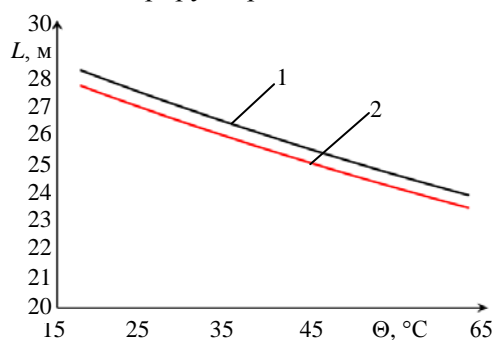


Рис. 2. Зависимость $L = f(\Theta)$ при $\Delta U_{\text{доп}} = 1,5 \%$ для проводника:
1 – с алюминиевыми жилами; 2 – с медными жилами

Fig. 2. The dependence $L = f(\Theta)$ if $\Delta U_{\text{доп}} = 1.5 \%$ for the conductor:
1 – aluminum conductors; 2 – copper conductors

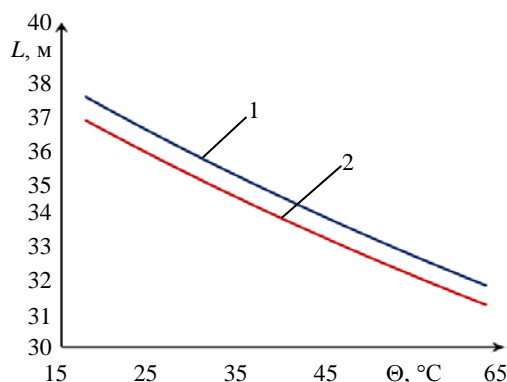


Рис. 3. Зависимость $L = f(\Theta)$ при $\Delta U_{\text{доп}} = 2,0 \%$ для проводника:
1 – с алюминиевыми жилами; 2 – с медными жилами

Fig. 3. The dependence $L = f(\Theta)$ if $\Delta U_{\text{доп}} = 2.0 \%$ for the conductor:
1 – aluminum conductors; 2 – copper conductors

При проектировании осветительных установок с использованием однофазных групповых линий в больших зданиях и помещениях предусматривается установка нескольких групповых щитков, которые размещаются на расстоянии 30–60 м один от другого. В этом случае групповая линия, как правило, имеет длину не более 30 м и реальные длины расчетных участков будут меньше предельных значений L , указанных в табл. 4. Следовательно, расчет по допустимой потере напряжения осветительных сетей, питающих светодиодные источники света, не является столь актуальным, как для газоразрядных ламп. Тем более что при емкостном характере реактивной мощности световых приборов потери напряжения в линиях будут меньше, чем при чисто активной нагрузке.

Суммарная потеря напряжения в однофазной групповой линии освещения, выраженная в %, рассчитывается по формуле

$$\Delta U \% = 2 \sum_{i=1}^n (P_i r_0 + Q_i x_0) l_i \cdot 10^5 / U_{\text{ном.ф}}^2, \quad (13)$$

где P_i , Q_i – активная и реактивная мощность i -го участка линии, кВт, квар; l_i – длина i -го участка линии, км; r_0 , x_0 – активное и индуктивное погонное сопротивление линии, Ом/км; n – количество участков групповой линии.

При емкостном характере реактивной мощности Q_i , когда ее величина имеет отрицательное значение, суммарная потеря напряжения снижается. В том случае, когда источники света генерируют реактивную мощность

и $\sum_{i=1}^n P_i r_0 l_i \leq \sum_{i=1}^n Q_i x_0 l_i$, потеря напряжения в осветительной линии $\Delta U \leq 0$.

То есть теоретически могут быть случаи, когда напряжение в конце линии освещения будет несколько больше, чем в начале. Следовательно, при расчете осветительных сетей по потере напряжения нужно знать величину коэффициента мощности, а также, какой характер имеет реактивная мощность световых приборов – емкостный или индуктивный.

Нагрев проводников с учетом температуры окружающей среды является определяющим фактором при выборе площади сечений проводов и кабелей сетей, питающих светодиодные световые приборы. По условию нагрева в осветительных сетях, как правило, не требуются проводники с большими сечениями. Во многих случаях принимаются минимальные сечения, соответствующие механической прочности проводников. Полученные результаты могут использоваться при выполнении электрических расчетов осветительных сетей, питающих светодиодные световые приборы.

ВЫВОДЫ

1. Исследованные световые приборы имеют стабильную потребляемую активную мощность в допустимом диапазоне отклонения напряжения от номинального значения при практически неизменном световом потоке источников света. Мощность светильника типа L-school 16/1500/Д при разных подведенных напряжениях соответствует паспортному значению, а прожектора типа Kanlux PACO LED45-W – на 25 % больше, чем указана в паспорте. Реактивная мощность светодиодных приборов имеет емкостный характер, что должно учитываться при расчете режимов напряжения в осветительных установках.

2. Так как светодиодные световые приборы генерируют реактивную мощность, то при относительно небольшой мощности световых приборов выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения для групповых линий не имеет решающего значения. Определяющим при выборе сечений жил проводов и кабелей групповых электрических сетей является расчет по допустимому нагреву с учетом температуры окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимов, Ю. В. Светодиоды: тенденция и проблемы внедрения / Ю. В. Трофимов, С. И. Лишик // Энергоэффективность. 2013. № 4. С. 24–26.
2. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сатцукевич. Минск: Техноперспектива, 2011. 543 с.
3. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-153–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 100 с.
4. Системы электрооборудования жилых и общественных зданий. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-149–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 63 с.
5. Силовое и осветительное электрооборудование промышленных предприятий. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-296–2014 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2014. 87 с.
6. Кнорринг, Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, В. Н. Сидоров, И. М. Фадин. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 448 с.
7. Правила устройства электроустановок. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.
8. Оценка и повышение эффективности работы установок промышленных предприятий / В. А. Анищенко [и др.]. Минск: БНТУ, 2014. 218 с.
9. Электроустановки зданий. Ч. 5: Выбор и монтаж электрооборудования. Гл. 52. Электропроводки: ГОСТ 30331.15–2001 (МЭК 364-5-52–93). Введ. 01.03.2003. Минск: БелГИСС; Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 17 с.
10. Тульчин, И. К. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И. К. Тульчин, Г. И. Нудлер. М.: Энергоатомиздат, 1990. 480 с.

Поступила 23.03.2016 Подписана в печать 25.05.2016 Опубликовано онлайн 03.08.2016

REFERENCES

1. Trofimov Yu. V., Lishik S. I. (2013) LEDs: the Trend and Challenges of Implementation. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (4), 24–26 (in Russian).
2. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Satsukevich V. N. (2011) *Electric Lighting*. Minsk, Technoperspectiva. 543 (in Russian).
3. TCP 45-2.04-153–2009 (2010) Natural and Artificial Lighting. Building Design Standards. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 100 (in Russian).
4. TCP 45-4.04-149–2009. (2009) The Electrical System of Residential and Public Buildings. Design Rules. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 63 (in Russian).
5. TCP 45-4.04-296–2014 (02250). (2014) Power and Lighting Electrical Equipment of Industrial Enterprises. Design Rules. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 87 (in Russian).
6. Knorring G. M., Sidorov V. N., Fadin I. M. (1992) *Reference Book for Electric Lighting Design*. St. Petersburg, Energoatomizdat. 448 (in Russian).
7. *Rules of Electrical Devices Mounting* (1985). 6th ed., Revised. and Added. Moscow, Energoatomizdat. 640 (in Russian).
8. Anishchenko V. A., Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Kolosova I. V. (2014) *Assessing and Improving the Efficiency of Devices of Industrial Enterprises*. Minsk: BNTU. 218 (in Russian).
9. State Standard 30331.15–2001 (IEC 364-5-52–93) (2003). Electrical Installations of Buildings. Part 5. Selection and Erection of Electrical Equipment. Chapter 52. Wiring. Minsk: BelGISS; Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. 17 (in Russian).
10. Tulchin I. K., Nudler G. I. (1990) *Electrical Networks and Electrical Equipment of Residential and Public Buildings*. Moscow, Energoatomizdat. 480 (in Russian).

Received: 23.03.2016

Accepted: 25.05.2016

Published online: 03.08.2016