

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562

УДК 621.32

Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием

Часть 1

В. Б. Козловская¹⁾, В. Н. Калечиц¹⁾

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

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

Реферат. Электрические сети наружного освещения формируются с учетом их функционального назначения. Обращается внимание на особенности режима работы линии наружного освещения с двусторонним питанием. Такой режим эксплуатации характерен для магистральных улиц и кольцевых дорог. На примере указанной в статье линии наружного освещения с двусторонним питанием произведен расчет режима. В качестве источников света в примере рассмотрены светильники с дуговыми натриевыми лампами высокого давления, подключенные через электромагнитную пускорегулирующую аппаратуру. Представлена методика расчета режима такой линии, точность определения расчетных параметров зависит от полноты исходных данных. Расчет осуществлен с помощью реализованной в среде MathCad программы. Определены режимные параметры для каждой фазы линии: напряжения в точках схемы, мощности, токи, потери мощности и падение напряжения на всех участках. Расчетные данные можно использовать для различных целей. Определены мощности в двух пунктах питания, на основании которых можно найти расход электроэнергии, зная время работы электрического освещения. Произведена оценка эффективности режима на основании обеспечения необходимого уровня напряжения на светильниках. Активная и реактивная мощности светильника определяются величиной напряжения на зажимах. Мощности светильников, равноудаленных от источника питания, отличаются между собой. Величина напряжения оказывает существенное влияние на показатели электропотребления и эксплуатационные характеристики источников света. С помощью данной программы можно смоделировать линию наружного освещения с двусторонним питанием любой конфигурации и рассчитать различные режимы работы (вечерний, ночной, диммирование и др.).

Ключевые слова: наружное освещение, электрические сети, пункт питания, источник света, светильник, моделирование режима, потери напряжения

Для цитирования: Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Часть 1 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 549–562

Адрес для переписки

Калечиц Вячеслав 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

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

Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply

Part 1

V. B. Kozlovskaya¹⁾, V. N. Kalechyts¹⁾

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

Abstract. The electrical outdoor lighting grids are formed with a regard for their functional purpose. The present article draws the attention to the specific features of operation mode of an outdoor lighting line with a bilateral supply. This mode of operation is characteristic for main streets and circular roads. The article presents the method of calculating of the mode of such kind and the calculation itself that has been fulfilled on behalf of the outdoor lighting line with a bilateral supply described in the article. Luminaries with high pressure sodium lamps connected through electromagnetic ballasts were used as sources of light. The accuracy of parameters under calculation depends on the completeness of the source data. The calculations were implemented with the use of a program realized in MathCad. For each line phase the following mode parameters were defined: voltage in the circuit points, power, current, power loss and voltage drop on all segments of the line. The calculated data can be used for various purposes. Power magnitudes were determined for two points of supply and one can determine the power consumption provided that the time of operation of electric lighting is known. Estimation of the efficiency the mode on the basis of ensuring the necessary level of voltage at the luminaires was implemented. Active and reactive power of a luminaire is determined by the voltage at the terminals of the luminaires. Magnitudes of power of luminaires located at different distances from the power source differ from each other. The voltage value has a significant effect on the electricity consumption values and on operating characteristics of a light source. With the use of the abovementioned program a line of outdoor lighting with a bilateral supply of any configuration can be simulated and different operation modes of a grid, viz. evening, night, dimming and other modes can be calculated.

Keywords: outdoor lighting, electric grids, point of supply, light source, luminaire, modeling of a mode, voltage losses

For citation: Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2016) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 549–562 (in Russian)

Введение

Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов представляет собой совокупность осветительных установок и систем управления ими для организации утилитарного освещения улиц, дорог, площадей, территорий микрорайонов и т. п., архитектурно-художественного освещения зданий и сооружений, а также световой рекламы. При проектировании наружного освещения необходимо обеспечивать нормативные величины количественных и качественных показателей осветительных установок с учетом установленных предельных отклонений, экономичности, надежности, удобства обслуживания осветительных установок, безопасности обслуживающего персонала и населения, рационального использования электроэнергии [1, 2].

Основными особенностями сетей наружного освещения являются их протяженность, а также значительная единичная мощность источников света. Кроме того, обслуживание таких сетей требует значительно больших затрат, чем сетей внутреннего освещения. Поэтому при формировании сетей наружного освещения особенно важно использовать светотехниче-

ское оборудование, характеристики которого максимально учитывают все предъявляемые к этим сетям требования. Сравнение источников света по критерию энергоэффективности представлено в [3]. В Минске эксплуатацией, текущим содержанием и текущим ремонтом сетей наружного освещения различного функционального назначения, а также световым оформлением города занимается УП «Мингорсвет». По состоянию на 01.10.2015, предприятие обслуживало 95363 светильника наружного освещения улиц, в том числе 786 – с дуговыми ртутными лампами (ДРЛ) высокого давления, 84329 – с дуговыми натриевыми лампами (ДНаТ) высокого давления, 10248 – с люминесцентными лампами. Кроме того, УП «Мингорсвет» обслуживает около 43 тыс. световых установок архитектурного освещения, рекламного и праздничного светового оформления города, из которых основную часть (50,3 %) составляют установки с лампами типа ДРИ (металлогалогенные) и ДНаТ (31,3 %). Имеются также светодиодные светильники (9,1 %), светильники с люминесцентными лампами (7,6 %), с лампами типа ДРЛ (1,2 %), накаливания и галогенными (0,5 %) [4].

Среди источников света, задействованных в наружном освещении г. Минска, подавляющее большинство составляют светильники с лампами типа ДНаТ, подключаемые к одной из фаз через электромагнитный пускорегулирующий аппарат (ЭМПРА) с импульсным зажигающим устройством и индивидуальным компенсирующим конденсатором. Среди таких источников света светильники с лампами мощностью 150 Вт составляют около 30 %, с лампами мощностью 100 Вт приблизительно 23 %, с лампами 250 Вт 19 %, с лампами 70 Вт 19 %, с лампами 400 Вт 9 %.

Распределительные сети наружного освещения выполняются кабельными (в земле или кабельной канализации) или воздушными (с использованием самонесущих изолированных проводов или в обоснованных случаях – неизолированных проводов). Общая протяженность линий освещения в г. Минске 4056,0 км, из них кабельных – 3423,5 км, воздушных – 632,5 км [4].

Распределительные линии в пределах одной линии выполняются одним сечением. Электроснабжение осветительных установок осуществляется через пункты питания. Они могут располагаться в трансформаторных подстанциях (ТП) 10/0,4 кВ или непосредственно на световых опорах, в этом случае расстояние от ТП до пункта питания не должно превышать 200 м. В пунктах питания осуществляются коммутация, управление, контроль и учет электрической энергии.

Установки наружного освещения и устройства управления ими в соответствии с требованиями к обеспечению надежности электроснабжения относят к следующим категориям [2]:

- первой – диспетчерские пункты управления сетями наружного освещения;
- второй – осветительные установки городских транспортных и пешеходных тоннелей, осветительные установки улиц, дорог и площадей категории А в г. Минске, областных центрах, городах-героях. К категории А

относятся магистральные дороги, магистральные улицы общегородского значения;

– третьей – остальные осветительные установки.

Для резервирования распределительных линий, относящихся ко второй категории по надежности, между крайними светильниками соседних участков для магистральных улиц рекомендуется предусматривать резервные кабельные линии (нормально отключаемые переключки) [5].

Основная часть

Обеспечение второй категории надежности может осуществляться путем двустороннего питания линии наружного освещения. Такой режим эксплуатации характерен для магистральных улиц, кольцевых дорог и т. д. Схемы формируются с учетом обеспечения устойчивой работы всех осветительных установок, подключенных к данной линии наружного освещения, при потере питания со стороны любого из пунктов питания.

Электрический расчет сети наружного освещения имеет свои особенности. Выбор сечения проводников осветительных линий производится по следующим условиям [2]:

– расчетное отклонение напряжения осветительной линии для наиболее удаленного светильника не должно превышать 5,0 % от номинального напряжения сети, для наименее удаленных – 2,5 %;

– по допустимому нагреву (или по допустимой плотности тока).

Также должна быть осуществлена проверка защитного аппарата на отключение тока однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке сети. При известной конфигурации осветительной линии и заданной величине допустимой потери напряжения ΔU можно определить сечение проводника, пользуясь приближенной формулой

$$S = \frac{M_{\text{прив}}}{C \Delta U_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{прив}}$ – приведенный момент нагрузки, кВт·м; C – коэффициент, величина которого зависит от материала проводника и напряжения сети (типа сети); $\Delta U_{\text{доп}}$ – допустимая потеря напряжения, %.

При расчетах зачастую пользуются такой приближенной формулой по условию допустимой потери напряжения, пренебрегая индуктивным сопротивлением проводов. В наружном освещении при определении расчетной нагрузки коэффициент спроса принимают равным 1 (учитывают потери в пускорегулирующей аппаратуре), а мощности ламп светильников – равными номинальным. На самом деле, мощность, потребляемая лампой, зависит от уровня напряжения на ней. Поскольку линии наружного освещения, как правило, достаточно протяженные, а единичная мощность ламп значительная, то и уровень напряжения на лампе снижается по мере удаленности светильника от источника питания. Соответственно уменьшается

потребляемая мощность, изменяются светотехнические характеристики источника света, например световой поток.

В [6] приведены основные особенности, связанные с расчетом режима работы и определением параметров линии наружного освещения с односторонним питанием. На основе расчетов произведена оценка влияния уровня напряжения в начале линии наружного освещения (пункт питания) на параметры такой сети – мощность, потребляемую электроэнергию, величину светового потока, срок службы ламп.

Произведем расчет режима работы линии наружного освещения с двусторонним питанием, учитывая максимально возможную исходную информацию, для получения точных показателей режима работы. В качестве примера рассмотрим наиболее характерную для наружного освещения г. Минска конфигурацию осветительной линии с двусторонним питанием. К разным ТП 10/0,4 кВ подключены пункты питания, расположенные непосредственно в ТП, поэтому расстоянием между ТП и пунктом питания пренебрегаем.

В осветительной линии задействованы лампы типа ДНаТ мощностью 150 Вт, подключенные через ЭмПРА с импульсным зажигающим устройством (активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА $P_{\text{ном}} = 170$ Вт) и компенсирующим конденсатором емкостью 20 мкФ (номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,86$) в светильнике типа ЖКУ. Удаленность от первого пункта питания до ближайшей опоры 80 м, от второго пункта питания до ближайшей опоры – 50 м. Расстояние между опорами 30 м (что приблизительно соответствует длине используемого кабеля), число опор 30, число светильников на опоре – один. Для питания светильников используется кабель с алюминиевыми жилами сечением 4 мм², проложенный в земле; значение удельного сопротивления $Z_{\underline{y}} = (7,81 + j0,095)$ м·Ом/м, допустимый ток с учетом четвертой рабочей жилы и при прокладке в земле $I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 38 = 35,0$ А. Светильники подключены симметрично (к каждой фазе по 10 светильников), распределение светильников между фазами А–В–С–А–В–С.

Пусковой ток лампы $I_{\text{л.пуск}} = 3,2$ А; полный рабочий ток лампы $I_{\text{л.ном}} = 1,8$ А; полный ток с учетом компенсации $I_{\text{ном}} = 0,9$ А. Для упрощения расчетов принимаем, что активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА и полный ток с учетом компенсации реактивной мощности изменяются пропорционально зависимостям, представленным в [7].

Значения фазных напряжений в двух пунктах питания принимаем равными 230 В. Нагрузка на светильнике (лампа и пускорегулирующий аппарат) определяется по активной мощности и полному току, которые зависят от уровня напряжения на зажимах светильника. Относительные значения потребляемой активной мощности $P(U)$ и полного тока $I(U)$ в зависимости от напряжения на зажимах светильника для лампы типа ДНаТ с компенсированным ЭмПРА определяются в соответствии с [7].

Тогда зависимости активной мощности (с учетом потерь в ЭмПРА) и полного тока (с учетом компенсации) светильника с лампой типа ДНаТ с компенсированной ЭмПРА номинальной мощностью 170 Вт от напряжения сети имеют вид, представленный на рис. 1.

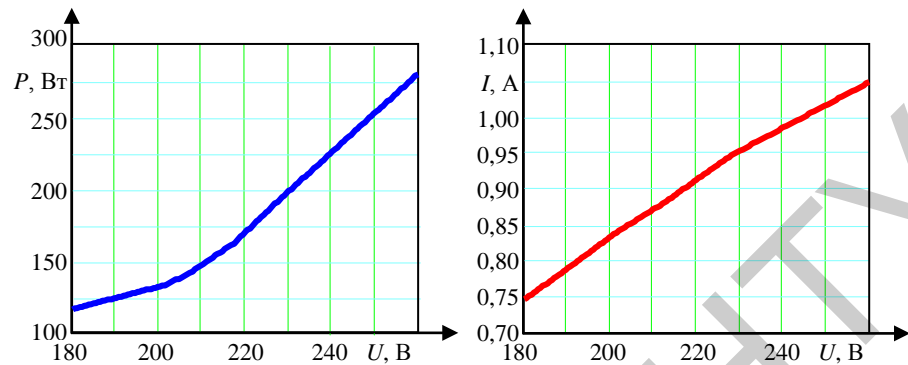


Рис. 1. Зависимости активной мощности $P(u)$ и полного тока $I(u)$ светильника номинальной мощностью 170 Вт от напряжения сети

Fig. 1. Dependences of active power (including losses in electromagnetic ballasts) $P(u)$ and total current (including compensation) $I(u)$ of luminaire with lamp HPS 170 W on the mains voltage

Расчет режима такой сети наружного освещения осуществляли методом последовательных приближений [8]. В осветительной сети используется глухозаземленная нейтраль в виде системы TN-S (с разделением нулевого проводника на рабочий и защитный). Расчетная схема представлена на рис. 2 (нулевой защитный проводник не показан).

Программа, позволяющая задавать исходные данные сети наружного освещения с двусторонним питанием и рассчитывать ее параметры, реализована в среде MathCad. Для удобства написания программы по расчету режима осветительная линия разделена на число участков, равное числу светильников, поэтому участки для каждой из трех фаз и нулевого рабочего проводника одинаковы независимо от наличия присоединения светильника к рассматриваемой фазе. Расчет режима сети с двусторонним питанием показан на рис. 2 на примере фазы A (напряжения в первом и втором пунктах питания 230 В). Нахождение параметров для фаз B и C аналогично. Обозначения на рис. 2 следующие: $\underline{U}_{A,П1}$, $\underline{U}_{A,1}$ – комплексное значение напряжения в первом пункте питания (П1) и 1-м узле фазы A соответственно; $\underline{S}_{A,П1-1}^H$, $\underline{S}_{A,П1-1}^K$ – то же полной мощности в начале и конце участка [П1–1] фазы A ; $\underline{S}_{A,1}^H$ – то же полной мощности светильника, подключенного к фазе A , имеющего первый порядковый номер (узел 1); $\Delta \underline{S}_{A,П1-1}$ – то же потерь полной мощности на участке [П1–1] фазы A ; $\Delta \underline{U}_{A,П1-1}$, $\Delta \underline{U}_{N,П1-1}$ – падение напряжения на участке [П1–1] фазы A и нулевого рабочего проводника N ; $\underline{I}_{A,П1-1}$, $\underline{I}_{N,П1-1}$ – комплексное значение полных токов на участке [П1–1] фазы A и нулевого рабочего проводника N ; $\underline{I}_{A,1}$ – то же полного тока светильника, имеющего первый порядковый номер.

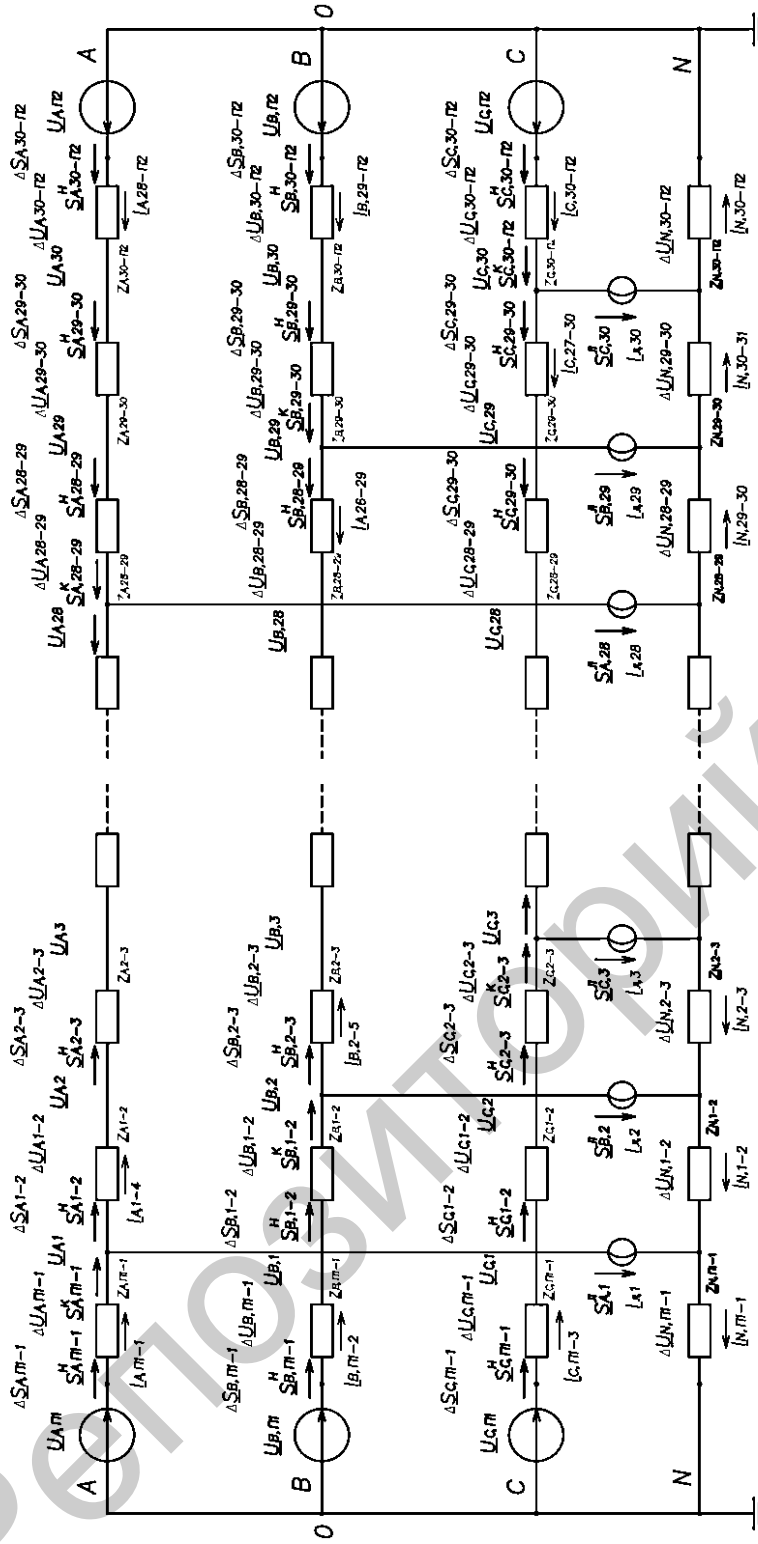


Рис. 2. Расчетная схема сети наружного освещения с двусторонним питанием

Fig. 2. The design scheme of the grid of outdoor lighting with a bilateral supply

Определение параметров осуществляли итерационным путем в такой последовательности. Первоначально задавали значения неизвестных фазных напряжений на зажимах светильников и в остальных точках схемы (рис. 2), например равными фазному напряжению в первом пункте питания (П1), В:

$$\underline{U}_{A,1}^{(0)} = \underline{U}_{A,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{A,30}^{(0)} = \underline{U}_{A,П1}^{(0)} = 230e^{j0};$$

$$\underline{U}_{B,1}^{(0)} = \underline{U}_{B,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{B,30}^{(0)} = \underline{U}_{B,П1}^{(0)} = 230e^{-j120^\circ};$$

$$\underline{U}_{C,1}^{(0)} = \underline{U}_{C,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{C,30}^{(0)} = \underline{U}_{C,П1}^{(0)} = 230e^{j120^\circ}.$$

Используя правило моментов для токов, можно определить токи головных участков (П1–1) и (30–П2) на основании величин нагрузок в узлах и соотношений сопротивлений отдельных участков сети. Величины токов головных участков (П1–1) и (30–П2) с учетом уравнильного тока:

$$\underline{I}_{A,(П1-1)}^{(1)} = \sum_{i=1}^M \frac{\underline{I}_{A,i}^{л(1)} \underline{Z}_{A,i-П2}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}} + \underline{I}_{A,ур}; \quad (2)$$

$$\underline{I}_{A,(30-П2)}^{(1)} = \sum_{i=1}^M \frac{\underline{I}_{A,i}^{л(1)} \underline{Z}_{A,i-П1}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}} - \underline{I}_{A,ур}, \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{A,i-П1}$ – комплексное значение полного сопротивления участка ($i-П1$), индекс (1) – первое приближение; A – наименование фазы; i – номер узла; $\underline{I}_{A,ур}$ – уравнильный ток, который зависит от разности величин напряжений в пунктах питания (точки П1 и П2) и определяется как

$$\underline{I}_{A,ур} = \frac{\underline{U}_{A,П1}^{(0)} - \underline{U}_{A,П2}^{(0)}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}}. \quad (4)$$

Комплексное значение полного тока светильника в первом приближении

$$\underline{I}_{A,i}^{л(1)} = I(U_{A,i}^{(0)}) e^{-j \arccos \left(\frac{P(U_{A,i}^{(0)})}{U_{A,i}^{(0)} \cdot I(U_{A,i}^{(0)})} \right)}, \quad (5)$$

где $P(U_{A,i}^{(1)})$, $I(U_{A,i}^{(1)})$ – значение потребляемой активной мощности и полного тока, определяемое в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 1.

Комплексные значения полных токов на участке (1–2) определяли на основе первого закона Кирхгофа (рис. 2)

$$\underline{I}_{A,1-2}^{(1)} = \underline{I}_{A,П1-1}^{(1)} - \underline{I}_{A,1}^{л(1)}. \quad (6)$$

Аналогичным образом рассчитывали значения полных токов на всех участках схемы. По найденным токам определяли значения фазных напря-

жений в узлах при известных напряжениях в пунктах питания. Комплексное значение напряжения в узле 1

$$\underline{U}_{A,1}^{(1)} = \underline{U}_{A,П1}^{(1)} - \Delta \underline{U}_{A,N;П1-1}^{(1)}. \quad (7)$$

Падение напряжения $\Delta \underline{U}_{A,N;П1-1}^{(1)}$ на участке (П1–1)

$$\Delta \underline{U}_{A,N;П1-1}^{(1)} = \underline{I}_{A,П1-1}^{(1)} \underline{Z}_{A,П1-1} + \underline{I}_{N,П1-1}^{(1)} \underline{Z}_{N,П1-1}, \quad (8)$$

где $\underline{Z}_{A,П1-1}$, $\underline{Z}_{N,П1-1}$ – комплексное значение полных сопротивлений участка для фазы A и нулевого рабочего проводника N .

Комплексное значение полных токов в нулевом рабочем проводнике N на участке (П1–1)

$$\underline{I}_{N,П1-1}^{(1)} = \underline{I}_{A,П1-1}^{(1)} + \underline{I}_{B,П1-1}^{(1)} + \underline{I}_{C,П1-1}^{(1)}. \quad (9)$$

После расчета токораспределения для каждого участка и уточнения напряжения в узлах первое приближение (итерация) заканчивается. Для получения более точных значений токораспределения и напряжений производятся повторные расчеты с использованием значений напряжений, полученных из предыдущей итерации (т. е. для второй итерации используются фазные напряжения из первой $\underline{U}_n^{(1)}$).

Расчет повторяли до тех пор, пока разность между модулями напряжений и разность между абсолютными значениями углов (фаз) напряжений k -го и $(k+1)$ -го приближений для i -го узла не превысили допустимых погрешностей:

$$\delta U_i = |U_i^{k+1} - U_i^k| \leq \varepsilon; \quad (10)$$

$$\Delta \delta_i = |\Delta \delta_i^{k+1} - \Delta \delta_i^k| \leq \xi. \quad (11)$$

Принимаем допустимые погрешности по модулю и фазе напряжений соответственно $\varepsilon = 0,0001$; $\xi = 0,0001$. После достижения итерационным путем указанной точности рассчитывали другие параметры схемы для всех участков.

Комплексное значение полной мощности светильника

$$\underline{S}_{A,i}^{\pi} = U_{A,i}^{(k+1)} \cdot I(U_{A,i}^{(k+1)}) e^{j \arccos \left(\frac{P(U_{A,i}^{(k+1)})}{U_{A,i}^{(k+1)} \cdot I(U_{A,i}^{(k+1)})} \right)}, \quad (12)$$

где $P(U_{A,i}^{(k+1)})$, $I(U_{A,i}^{(k+1)})$ – значение потребляемой активной мощности и полного тока, определяемое в соответствии с зависимостями на рис. 1; индекс $(k+1)$ – приближение, на котором завершился расчет.

Комплексное значение потерь полной мощности на участке $((i-1)-i)$

$$\Delta \underline{S}_{A,(i-1)-i} = \left(I_{A,(i-1)-i}^{(k+1)} \right)^2 (R_{A,(i-1)-i} + jX_{A,(i-1)-i}), \quad (13)$$

где $R_{A,(i-1)-i}$, $X_{A,(i-1)-i}$ – активное и реактивное сопротивление участка;
 $I_{A,(i-1)-i}^{(k+1)}$ – полный ток участка $((i-1)-i)$.

Комплексное значение полной мощности в начале участка $((i-1)-i)$

$$\underline{S}_{A,(i-1)-i}^{(1)} = \underline{U}_{A,i-1}^{(k+1)} \cdot \underline{I}_{A,(i-1)-i}^{*(k+1)}, \quad (14)$$

где $\underline{U}_{A,i-1}^{(k+1)}$ – комплексное напряжение в начале участка $((i-1)-i)$ фазы A ;
 $\underline{I}_{A,(i-1)-i}^{*(k+1)}$ – комплексно сопряженное значение тока участка $((i-1)-i)$ фазы A .

Результаты расчета рассматриваемого режима работы представлены в табл. 1, 2 (без значений тока в нулевом проводнике). На основании рассчитанных данных ток в нулевом проводнике на всех участках схемы имеет значение $I_N = 0,5-0,6$ А (без учета высших гармоник). Газоразрядные лампы высокого давления из-за специфики газового разряда являются источниками высших гармоник (в основном три гармоники), поэтому реальная величина тока в нулевом проводнике может быть сопоставимой с током в фазных проводниках [9]. В табл. 1 показаны значения полного тока, потерь мощностей и активной и реактивной мощностей в начале каждого участка (в комплексном виде) для каждой фазы. В табл. 2 отображены значения напряжений в точках схемы сети (рис. 2) и значения активной и реактивной мощностей всех светильников для каждой фазы. Из представленной в таблицах информации видно, что мощности, потребляемые светильниками, разноудаленными от источника питания, существенно отличаются между собой, а также от номинального значения. Объясняется это тем, что потребляемая мощность лампы зависит от уровня напряжения на ней, а уровень напряжения в протяженной сети наружного освещения существенно снижается по мере удаления от источника питания. Кроме того, номинальные параметры выпускаемых ламп установлены для напряжения 220 В, в то время как в соответствии с [10] в системах электроснабжения потребителей переменного тока должно применяться напряжение 230 В. Поэтому светильники, ближайšie к источнику питания, потребляют активную мощность, на 24–26 % превышающую ее номинальное значение.

На основании представленных данных можно рассчитать фактическую потребляемую сетью наружного освещения активную мощность. В пунктах питания (участки (П1–1) и (30–П2)) значения потребляемых активных мощностей соответственно равны:

$$P_{П1\Sigma} = 947,3 + 889,8 + 834,8 = 2671,9 \text{ Вт};$$

$$P_{П2\Sigma} = 889,6 + 946,3 + 1005,3 = 2841,2 \text{ Вт}.$$

Таблица 1

Значения параметров каждого участка линии наружного освещения с двусторонним питанием
The parameter magnitudes of all parts of the outdoor lighting line with a bilateral supply

Значение величины на участке	11-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
I_A, A	4,6	3,7	3,7	3,7	2,8	2,8	2,8	1,9	1,9	1,9	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1
I_B, A	4,4	4,4	3,4	3,4	3,4	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	1,6	0,7	0,7	0,7	-0,1	-0,1
I_C, A	4,1	4,1	4,1	3,2	3,2	3,2	2,3	2,3	2,3	1,4	1,4	1,4	0,5	0,5	0,5	0,4
$S_A^H, B \cdot A$	947,3 + j427,4	746,7 + j427,4	743,4 + j427,4	740,1 + j427,4	556,0 + j326,3	554,1 + j326,3	552,2 + j326,3	374,2 + j223,5	373,3 + j223,5	372,4 + j223,5	198,6 + j119,6	198,4 + j119,6	198,2 + j119,6	26,6 + j15,2	26,6 + j15,2	26,6 + j15,2
$S_B^H, B \cdot A$	889,8 + j497,0	877,5 + j496,8	688,1 + j397,7	685,2 + j397,7	682,3 + j397,7	500,4 + j296,3	498,8 + j296,3	497,2 + j296,3	320,8 + j193,3	320,1 + j193,3	319,4 + j193,3	146,5 + j89,3	146,4 + j89,3	146,3 + j89,3	24,9 - j15,2	24,9 - j15,2
$S_C^H, B \cdot A$	834,8 + j466,2	824,0 + j466,1	820,0 + j466,0	632,0 + j366,3	629,6 + j366,3	627,2 + j366,3	446,2 + j264,5	444,9 + j264,5	443,6 + j264,5	267,8 + j161,3	267,3 + j161,3	266,8 + j161,3	94,2 + j57,2	94,1 + j57,2	94,1 + j57,2	94,1 + j57,2
$\Delta S_A, B \cdot A$	13,9 + j0,2	3,3 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,2 + j0	0,2 + j0	0,2 + j0	0	0	0
$\Delta S_B, B \cdot A$	12,3 + j0,1	4,6 + j0,1	2,9 + j0	2,9 + j0	2,9 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0
$\Delta S_C, B \cdot A$	10,8 + j0,1	4,0 + j0,1	4,0 + j0	2,4 + j0	2,4 + j0	2,4 + j0	1,3 + j0	1,3 + j0	1,3 + j0	0,5 + j0	0,5 + j0	0,5 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0
Значение величины на участке	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	26-27	27-28	28-29	29-30	30-31	31-32
I_A, A	-0,7	-0,7	-0,7	-1,6	-1,6	-1,6	-2,5	-2,5	-2,5	-3,4	-3,4	-3,4	-4,4	-4,4	-4,4	-4,4
I_B, A	-0,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,9	-1,9	-1,9	-2,8	-2,8	-2,8	-3,7	-3,7	-3,7	-4,6	-4,6	-4,6
I_C, A	-0,4	-0,4	-1,3	-1,3	-1,3	-2,2	-2,2	-2,2	-3,1	-3,1	-3,1	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0
$S_A^H, B \cdot A$	-144,7 - j89,3	-144,8 - j89,3	-144,9 - j89,3	-318,0 - j193,3	-318,7 - j193,3	-319,4 - j193,3	-496,2 - j296,3	-497,8 - j296,3	-499,4 - j296,3	-681,9 - j397,6	-684,6 - j397,6	-887,5 - j497,0	-887,4 - j496,8	-887,4 - j496,8	-889,6 - j497,0	-889,6 - j497,0
$S_B^H, B \cdot A$	-24,9 - j115,2	-196,5 - j119,6	-196,7 - j119,6	-370,8 - j223,4	-370,8 - j223,4	-371,7 - j223,4	-550,7 - j326,1	-550,7 - j326,1	-552,6 - j326,1	-738,7 - j427,0	-738,7 - j427,0	-946,3 - j525,6	-946,3 - j525,6	-946,3 - j525,6	-946,3 - j525,6	-946,3 - j525,6
$S_C^H, B \cdot A$	-77,4 - j47,1	-77,4 - j47,1	-249,7 - j151,3	-250,1 - j151,3	-250,5 - j151,3	-425,7 - j254,7	-426,8 - j254,7	-428,0 - j254,7	-607,8 - j356,8	-610,1 - j356,8	-612,4 - j356,8	-798,8 - j457,0	-802,7 - j457,0	-802,7 - j457,0	-806,6 - j457,0	-806,6 - j457,0
$\Delta S_A, B \cdot A$	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	2,9 + j0	2,9 + j0	2,9 + j0	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1
$\Delta S_B, B \cdot A$	0	0,2 + j0	0,2 + j0	0,2 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0
$\Delta S_C, B \cdot A$	0	0	0,4 + j0	0,4 + j0	0,4 + j0	1,2 + j0	1,2 + j0	1,2 + j0	2,3 + j0	2,3 + j0	2,3 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0

Примечание. Векторы величин, имеющих отрицательные значения в табл. 1, направлены в сторону второго пункта питания (П2); векторы величин, имеющих положительные значения, направлены в сторону первого пункта питания (П1).

Таблица 2

Значения параметров в узлах линии наружного освещения с двусторонним питанием
The parameter magnitudes in the nodes of the outdoor lighting line with a bilateral supply

Точка схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
U_A, B	227,2	226,6	225,8	225,0	224,5	223,9	223,2	223,0	222,5	222,1	222,0	221,7	221,6	221,6	221,5	
U_B, B	227,4	226,5	225,9	225,1	224,3	223,9	223,4	222,8	222,6	222,2	221,8	221,7	221,5	221,3	221,5	
U_C, B	228,0	227,1	226,2	225,6	224,9	224,1	223,8	223,2	222,7	222,5	222,2	221,8	221,8	221,6	221,5	
$S_A^n, B \cdot A$	186,7 + +j98,6	-	-	180,6 + +j101,0	-	-	176,0 + +j102,7	-	-	172,9 + +j103,8	-	-	171,3 + +j104,4	-	-	
$S_B^n, B \cdot A$	-	184,8 + +j99,1	-	-	179,1 + +j101,3	-	-	174,9 + +j102,9	-	-	172,2 + +j104,0	-	-	171,0 + +j104,4	-	
$S_C^n, B \cdot A$	-	-	183,8 + +j99,7	-	-	178,5 + +j101,7	-	-	174,6 + +j103,2	-	-	172,2 + +j104,0	-	-	171,3 + +j104,4	
Точка схемы	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Π2
U_A, B	221,4	221,7	221,8	221,9	222,3	222,6	222,9	223,6	224,0	224,5	225,4	226,0	226,7	227,7	228,6	230
U_B, B	221,5	221,5	221,8	221,9	222,1	222,6	222,9	223,3	224,0	224,5	225,0	225,9	226,7	227,4	228,5	230
U_C, B	221,7	221,7	221,7	222,1	222,2	222,4	223,0	223,4	223,7	224,5	225,1	225,6	226,6	227,3	228,1	230
$S_A^n, B \cdot A$	171,1 + +j104,5	-	-	172,4 + +j104,0	-	-	175,2 + +j103,0	-	-	179,5 + +j101,3	-	-	185,3 + +j99,0	-	-	-
$S_B^n, B \cdot A$	-	171,2 + +j104,4	-	-	173,0 + +j103,8	-	-	176,2 + +j102,6	-	-	180,8 + +j100,8	-	-	187,0 + +j98,4	-	-
$S_C^n, B \cdot A$	-	-	171,9 + +j104,1	-	-	174,0 + +j103,4	-	-	177,5 + +j102,0	-	-	182,5 + +j100,1	-	-	189,0 + +j97,4	-

Отличие суммарных нагрузок вызвано различной удаленностью пунктов питания от ближайшей к ним опоры. Полное значение потребляемой сетью активной мощности составит $P_{\Sigma} = P_{\Pi 1\Sigma} + P_{\Pi 2\Sigma} = 5513$ Вт. Эта же величина, полученная расчетным путем, составит $P_p = 170 \cdot 30 = 5100$ Вт. Как видно, погрешность 413 Вт, или 8 %, что немало.

Активная и реактивная мощности светильника определяются величиной напряжения на зажимах. Для рассматриваемой линии освещения с двусторонним питанием на основании табл. 2 можно определить светильники с наибольшим отклонением напряжения на их зажимах. Взяв в качестве примера фазу А, светильник в точке 16 будет иметь наименьшее напряжение на зажимах, равное 221,4 В. Отклонение напряжения от номинального значения на этом светильнике составляет 3,7 %; потребляемая им активная мощность 171,1 Вт. Для сравнения, наиболее близкий к первому пункту светильник, подключенный к фазе А, имеет следующие параметры: напряжение 227,2 В (отклонение от номинального 1,2 %); потребляемую активную мощность 186,7 Вт.

ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что потребляемая мощность лампы зависит от уровня напряжения на ней, а уровень напряжения в протяженной сети наружного освещения существенно снижается по мере удаления от источника питания. Кроме того, номинальные параметры выпускаемых ламп установлены для напряжения 220 В, в то время как в соответствии с [10] в системах электроснабжения потребителей переменного тока должно применяться напряжение 230 В. Поэтому светильники, ближайшие к источнику питания, потребляют активную мощность, на 24–26 % превышающую ее номинальное значение.

2. На основании значений активных мощностей головных участков (П1–1) и (30–П2) для каждой из фаз, зная суточный график включения и отключения сети наружного освещения, можно с наименьшей погрешностью определить расчетное значение расхода электроэнергии сети наружного освещения за определенный период времени.

3. Задаваясь различными напряжениями в пунктах питания, с помощью предложенной программы можно смоделировать различные режимы (в том числе работу в вечернем режиме, переход на ночной режим, переход на диммирование и т. д.), сформировать линию наружного освещения с двусторонним питанием любой конфигурации и оценить эффективность режима на основании обеспечения необходимого уровня напряжения на светильниках, а также определения расхода электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. Минск: Техноперспектива, 2011. 543 с.

2. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-287–2013. Минск: Минстройархитектуры, 2013. 19 с.
3. Козловская, В. Б. Энергоэффективные источники света в системе наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергия и Менеджмент. 2014. № 2. С. 8–13.
4. Минский городской исполнительный комитет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minsk.gov.by/ru/org/6072/>. Дата доступа: 10.12.2015.
5. Правила устройства электроустановок: 6-е изд. М.: Госэнергонадзор, 2000. 497 с.
6. Козловская, В. Б. Влияние величины напряжения на режим работы сети наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). 2013. № 3. С. 18–25.
7. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.
8. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 2-е изд. Р-н-Д.: Феникс, 2008. 715 с.
9. Стандартные напряжения: ГОСТ 29322–92. Введ. 01.01.93. М.: Изд-во стандартов, 1992. 9 с.
10. Клюев, С. А. Освещение производственных помещений / С. А. Клюев. М.: Энергия, 1979. 152 с.

Поступила 11.04.2016 Подписана в печать 10.06.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

REFERENCES

1. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Satsukevich V. N. (2009) *Electric Lighting*. Minsk, Tekhnoperspectiva. 543 (in Russian).
2. ТКП 45-4.04-287–2013. External Lighting of Cities, Townships and Rural Settlements. Design Rules. Minsk, Ministry of Architecture Civil Engineering and Construction of Belarus, 2013. 19 (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2014) Energy Efficient Sources of Light in the System of External Lighting. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 8–13 (in Russian).
4. Minsk City Executive Committee. Available at: <http://minsk.gov.by/ru/org/6072/>. (Accessed 10 December 2015) (in Russian).
5. *Rules of Arrangement of Electrical Installations*. 6th ed. (2000) Moscow: State Energy Supervision. 497 (in Russian).
6. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2013) Influence of Voltage Value on Operational Mode of Outdoor Lighting Grid Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (3), 18–25 (in Russian).
7. Eisenberg Yu. B. ed. (2006) *The Reference Book on Light Engineering*. Moscow, Znak Publ. 972 (in Russian).
8. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2008) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 2nd ed. Rostov-on-Don, Fenix. 715 (in Russian).
9. State Standard 29322–92. Standard Voltage. Moscow, Standards Publishing House, 1992. 9 (in Russian).
10. Klyuev S. A. (1979) *Lighting of Industrial Premises*. Moscow, Energiy. 152 (in Russian).

Received: 11 April 2016 Accepted: 10 June 2016 Published online: 29 November 2016