

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557

УДК 621.32

## **Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения**

**В. Б. Козловская<sup>1)</sup>, В. Н. Калечиц<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Режим работы осветительной линии зависит от правильности выбора сечения жил проводников. Величина сечения влияет на обеспечение требуемых уровней напряжения на источниках света. Произведен выбор сечения проводников на основе расчетов режима работы указанной в статье типовой линии наружного освещения. В качестве источников света в примере рассмотрены светильники с дуговыми натриевыми лампами высокого давления (ДНАТ), подключенные через электромагнитную пускорегулирующую аппаратуру. При выборе сечения жил проводников осветительных линий обычно пользуются рядом упрощений. Уделено внимание выбору сечений без таких допущений: учитывается индуктивное сопротивление проводников; мощность светильника зависит от уровня напряжения на нем. Также светильники с лампами ДНАТ являются источниками высших гармоник. Показаны три варианта расчета в зависимости от учета (или неучета) высших нечетных гармоник. В статье описаны методики расчетов режима осветительной линии. Расчеты осуществлены с помощью реализованных в среде MathCad программ. Определены режимные параметры для каждой фазы линии: напряжения в точках схемы, мощности, токи, потери мощности и напряжения на всех участках. Представлены графики распределения напряжений в точках осветительной линии при трех вариантах расчета, построенные для различных сечений алюминиевых жил. На их основе осуществлен выбор оптимального значения сечения проводников осветительной линии. Произведено сравнение полученных результатов различных вариантов расчета. Проанализировано влияние высших гармоник на режимные параметры данной линии. Наличие высших гармоник приводит к увеличению потерь напряжения, искажению синусоидальности напряжения. Ток в нулевом рабочем проводнике сопоставим с током в фазных проводниках, причем определяющее значение на его величину оказывают гармоники, кратные трем.

**Ключевые слова:** наружное освещение, осветительная линия, светильник, сечение проводника, высшие гармоники, потери напряжения, моделирование режима

**Для цитирования:** Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557

---

### **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

---

## Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting

V. B. Kozlovskaya<sup>1)</sup>, V. N. Kalechyts<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The operating mode of the lighting line depends on the correct choice of conductor cross section. The magnitude of the cross section has an influence on the provision of the required voltage levels on the light sources. The choice of the conductor cross section has been fulfilled based on calculations of the operating mode of the standard line of outdoor lighting specified in the article. Luminaries with high pressure sodium lamps connected through electromagnetic ballasts were used as sources of light. When choosing the conductor cross section of light lines a number of simplifications are commonly used. Attention is paid to the choice of sections without such assumptions: the inductive resistance of conductors is taken into account; the power of the luminaire depends on the voltage level in it. Luminaries with high pressure sodium lamps are the sources of high harmonics. Three variants of calculation are demonstrated depending on the accounting (or non-accounting) of high odd harmonics. The methods of calculating the mode of the lighting line are also presented in the article. The calculation is performed with the aid of Mathcad software. Operating parameters for each phase of the line (i.e. voltage in the items of the scheme, power, currents, power, and voltage losses in all the sections) were determined. The diagrams of the voltage distribution at items of the lighting line for three variants of calculation are plotted for various sections of aluminum conductors. On this basis the choice of the optimum magnitude of the conductor cross section of the lighting line was made. The obtained results of different calculation variants are compared. The comparison of the results obtained with the use of various methods of calculation was made. The impact of high harmonics on the operating mode of the line under consideration has been analyzed. The presence of high harmonics causes an increase of voltage losses, the distortion of sinusoidal voltage. The current of neutral conductor is comparable with the current of phase conductors, besides, the harmonics multiple of 3 are of great importance as they influence on the magnitude of the current.

**Keywords:** outdoor lighting, lighting line, luminaire, section of conductor, high harmonics, voltage losses, modeling of mode

**For citation:** Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 544–557. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557 (in Russian)

### Введение

Выбор сечений проводников осветительной линии с учетом всех влияющих на него факторов позволяет обеспечивать требуемые уровни напряжения на источниках света во всех режимах, создавая оптимальные условия эксплуатации. При этом сечение проводников не должно быть завышено, чтобы необоснованно не увеличивать стоимость электрической сети.

Выбор сечения проводников линии наружного освещения производится по [1]:

- допустимому значению потери напряжения осветительной линии, которое для наиболее удаленного светильника не должно превышать 5,0 %, для наименее удаленного – 2,5 % от номинального напряжения сети;
- допустимому нагреву.

При выборе сечения проводников осветительной линии обычно пользуются рядом упрощений:

- 1) расчет по условию допустимой потери напряжения производится без учета индуктивного сопротивления проводников;
- 2) мощность светильника включает в себя потери в пускорегулирующей аппаратуре и мощность лампы. Эти величины принимают равными номинальным, хотя мощность, потребляемая лампой, зависит от уровня напряжения на ней [2];
- 3) не учитываются высшие гармоники, источником которых являются светильники с газоразрядными лампами высокого давления.

### Основная часть

Покажем, насколько значимым является учет вышеперечисленных упрощений при выборе сечения проводников на примере осветительной линии с односторонним питанием с напряжениями в каждой фазе пункта питания  $U_{\text{ф.ном}} = 230 \text{ В}$ .

Рассмотрим типовую трехфазную линию наружного освещения с односторонним питанием, схема которой представлена на рис. 1. Пункт питания, к которому подключена линия, расположен непосредственно в ТП 10/0,4 кВ. Для освещения используются лампы типа ДНаТ мощностью 150 Вт, каждая из которых подключена через электромагнитный пускорегулирующий аппарат (ЭмПРА) с импульсным зажигающим устройством [3] и компенсирующим конденсатором ( $\cos\varphi_n = 0,86$ ) в светильнике типа ЖКУ. Удаленность от пункта питания до ближайшей опоры  $l_1 = 80 \text{ м}$ . Расстояние между опорами  $l = 25 \text{ м}$ , число опор 30, число светильников на опоре 1. Для питания светильников используется кабель с алюминиевыми жилами, проложенный в земле. Распределение светильников между фазами  $A-B-C-A-B-C$ , подключены симметрично.

Номинальные технические характеристики рассматриваемого светильника: активная мощность лампы ДНаТ равна 150 Вт, активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА  $P_{\text{ном}} = 170 \text{ Вт}$ ; номинальное напряжение  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ; пусковой ток лампы  $I_{\text{л.пуск}} = 3,2 \text{ А}$ ; полный рабочий ток лампы  $I_{\text{л.ном}} = 1,8 \text{ А}$ ; полный ток с учетом компенсации  $I_{\text{ном}} = 0,9 \text{ А}$ .

В осветительной сети используется глухозаземленная нейтраль в виде системы TN-S (с разделением нулевого проводника на рабочий и защитный). Расчетная схема представлена на рис. 1 (нулевой защитный проводник не показан). Для удобства написания программ по расчету режима осветительную линию делим 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.

Первоначально произведен расчет сечения жилы кабеля осветительной линии с учетом приведенных выше упрощений (1–3) в соответствии с требованиями [1].

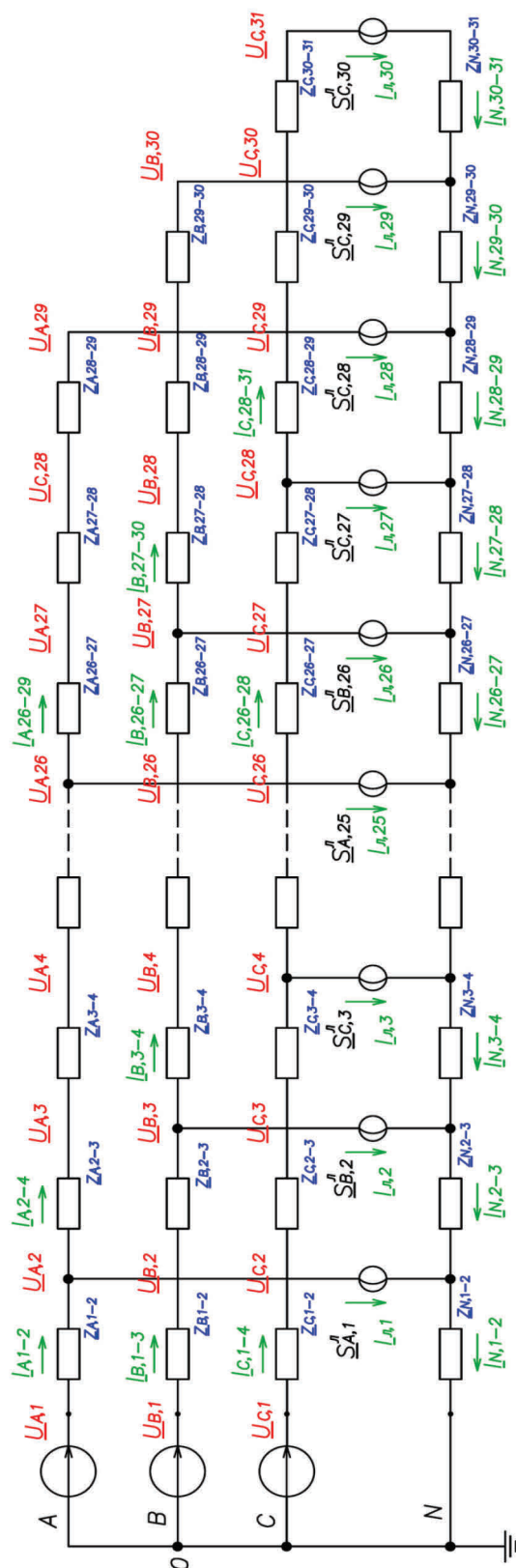


Рис. 1. Расчетная схема линии наружного освещения:  $\underline{U}_{A,1}, \underline{U}_{A,2}$  – комплексное значение напряжения в первом пункте питания и на первом светильнике фазы  $A$  соответственно;  $\underline{S}_{A,1}$  – то же полной мощности светильника, подключенного к фазе  $A$ , имеющего первый порядковый номер узел 1);

( $\underline{U}_{A(1-2)}, \underline{I}_{N(1-2)}$  – то же полного тока на участке (1–2) фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;

$\underline{I}_{N,1}$  – то же полного тока светильника, имеющего первый порядковый номер (обозначения параметров фаз  $B$  и  $C$  аналогичны)

Fig. 1. The design scheme of the grid of outdoor lighting:  $\underline{U}_{A,1}, \underline{U}_{A,2}$  – complex voltage values in the first power supply item and the first luminaire of the phase  $A$ , respectively;  $\underline{S}_{A,1}$  – complex magnitude of the total power of the luminaire connected to the phase  $A$  having the first sequence number (unit 1);

( $\underline{U}_{A(1-2)}, \underline{I}_{N(1-2)}$  – complex magnitude of the full currents in the area (1–2) of the phase  $A$  and the neutral working conductor  $N$ ;

$\underline{I}_{N,1}$  – complex magnitude of the total current of the lamp having the first sequence number (the marking of parameters of the phases  $B$  and  $C$  are analogous)

В результате рассчитано необходимое сечение алюминиевых жил кабельной линии 10 мм<sup>2</sup>. При этом напряжение в конце рассматриваемой линии равно 219,2 В (потеря напряжения составляет  $\Delta U_{\%} = 4,7 \%$ ). Также для сечения 16 мм<sup>2</sup> найдено напряжение в конце рассматриваемой линии, равное 223,2 В ( $\Delta U_{\%} = 2,9 \%$ ); для сечения 25 мм<sup>2</sup> напряжение в конце рассматриваемой линии 225,6 В ( $\Delta U_{\%} = 1,9 \%$ ).

Далее рассмотрены расчеты сечений жилы кабеля вышеуказанной линии наружного освещения без упрощений (1–3).

Программы по расчету реализованы в среде MathCad и учитывают максимально возможную исходную информацию для выбора сечения жил проводника и получения точных показателей режимов работы. С их помощью выбор сечения кабеля произведен тремя вариантами расчета режима работы данной линии:

- a) без учета высших гармоник;
- b) с учетом высших гармоник, кратных трем (до 39-й);
- c) с учетом всех гармоник (до 39-й).

Для всех вариантов расчета принято, что напряжение в пункте питания имеет синусоидальный характер при отсутствии нагрузки (отходящие линии отключены) и действующее значение равно 230 В.

Для каждого случая рассчитаны режимы работы сети при использовании кабелей со следующими сечениями  $S$  алюминиевых жил:

$S = 6$  мм<sup>2</sup> с удельным сопротивлением  $\underline{Z}_y = (5,21 + j0,9)$  мОм/м, допустимый ток с учетом четвертой рабочей жилы и при прокладке в земле  $I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 46 = 42,3$  А [4];

$S = 10$  мм<sup>2</sup>;  $\underline{Z}_y = (3,12 + j0,073)$  мОм/м,  $I_{\text{доп}} = 64,4$  А;

$S = 16$  мм<sup>2</sup>;  $\underline{Z}_y = (1,95 + j0,0675)$  мОм/м,  $I_{\text{доп}} = 82,8$  А;

$S = 25$  мм<sup>2</sup>;  $\underline{Z}_y = (1,25 + j0,0662)$  мОм/м,  $I_{\text{доп}} = 105,8$  А.

Расчеты режимов осуществлены методом последовательных приближений [5].

### Учет нелинейности осветительной нагрузки

При расчете учтено влияние уровня напряжения на величину нагрузки для каждого светильника. Светильник с газоразрядной лампой высокого давления типа ДНаТ обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой и является источником высших гармоник. Нелинейность вольт-амперной характеристики светильника приводит к тому, что при различных значениях напряжения будут разные величины коэффициента мощности и сопротивления.

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 [6].

Для светильника с лампой типа ДНаТ номинальной мощностью 170 Вт указанные зависимости для действующих значений имеют вид, как на рис. 2, 3.

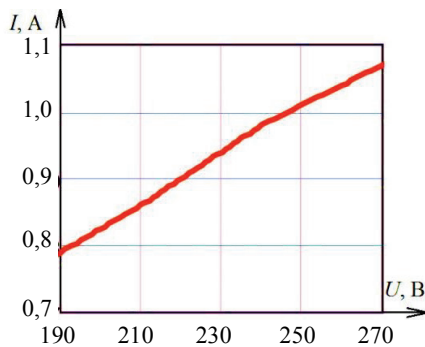


Рис. 2. Зависимость полного тока  $I(U)$  светильника номинальной мощностью 170 Вт с учетом компенсации с лампой типа ДНаТ с компенсированным электромагнитным пускорегулирующим аппаратом от напряжения сети

Fig. 2. Dependence of total current  $I(U)$  of a luminaire of the rated power of 170 W including compensation with a HPS lamp with an electromagnetic compensated ballast unit on the mains voltage

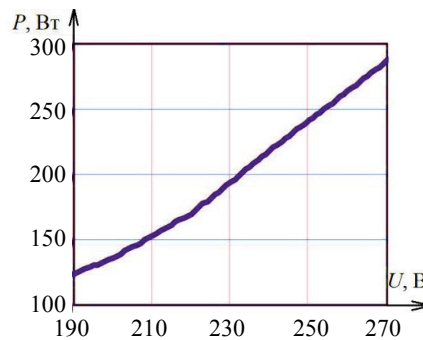


Рис. 3. Зависимость активной мощности  $P(U)$  светильника номинальной мощностью 170 Вт с учетом потерь в электромагнитном пускорегулирующем аппарате с лампой типа ДНаТ с компенсированным электромагнитным пускорегулирующим аппаратом от напряжения сети

Fig. 3. Dependence of active power  $P(U)$  of a luminaire of the rated power of 170 W including losses in electromagnetic ballasts with a HPS lamp with an electromagnetic compensated ballast unit on the mains voltage

### Расчет режимных параметров

Расчет параметров режима заключается в определении токов, мощностей, падения напряжения на всех участках рассматриваемой осветительной линии, напряжений во всех точках линии для каждой фазы.

Не учитывая высшие гармоники, действующие значения токов и напряжений определяются только по основной (первой) гармонике (вариант расчета а).

Определение параметров осуществляется итерационным путем в два этапа в такой последовательности.

При первой итерации значения фазных напряжений во всех точках схемы (рис. 1) принимаются равными напряжению в начале линии (в пункте питания).

Точка 1 на рис. 1 соответствует пункту питания. То есть значения напряжений в каждой фазе равны:  $\underline{U}_{A,1}^{(1)} = 230e^{j0}$  В;  $\underline{U}_{B,1}^{(1)} = 230e^{-j120^\circ}$  В;  $\underline{U}_{C,1}^{(1)} = 230e^{j120^\circ}$  В.

Комплексное значение полной мощности светильника в первом приближении определяется как

$$\underline{S}_{A,n}^{(1)} = \underline{U}_{A,n}^{(1)} \cdot I(U_{A,n}^{(1)}) e^{j \cdot \arccos \left( \frac{P(U_{A,n}^{(1)})}{U_{A,n}^{(1)} \cdot I(U_{A,n}^{(1)})} \right)}, \quad (1)$$

где  $I(U_{A,n}^{(1)})$ ,  $P(U_{A,n}^{(1)})$  – действующее значение полного тока и величина потребляемой активной мощности, определяемые в соответствии с зависимостями на рис. 2, 3; индекс (1) – первое приближение; A – наименование фазы; n – номер узла.

Покажем определение мощностей на примере участка (28–29) фазы  $A$ .

Комплексное значение потерь полной мощности на участке (28–29) определяется как

$$\Delta \underline{S}_{A,(28-29)}^{(1)} = \left( \frac{S_{A,(28-29)}^{k(1)}}{U_{A,29}^{(1)}} \right)^2 (R_{A,(28-29)} + jX_{A,(28-29)}), \quad (2)$$

где  $R_{A,(28-29)}$ ,  $X_{A,(28-29)}$  – активное и реактивное сопротивления рассматриваемого участка (в зависимости от сечения жил используемого кабеля);  $S_{A,(28-29)}^{k(1)}$ ,  $U_{A,29}^{(1)}$  – полная мощность и фазное напряжение в конце участка (28–29).

Комплексное значение полной мощности в начале участка (28–29)

$$\underline{S}_{A,(28-29)}^{n(1)} = \underline{S}_{A,28}^{l(1)} + \Delta \underline{S}_{A,(28-29)}^{(1)}, \quad (3)$$

где  $S_{A,(28-29)}^{k(1)} = S_{A,28}^{l(1)}$ .

Расчет потокораспределения аналогично выполняется поочередно для каждого участка (для трех фаз). На этом первый этап алгоритма заканчивается.

Второй этап заключается в расчете уточненных значений фазных напряжений при известном напряжении в начале линии (пункте питания). Расчет покажем на примере участка (1–2). Комплексное значение напряжения в точке 2

$$\underline{U}_{A,2}^{(1)} = \underline{U}_{A,1}^{(1)} - \Delta \underline{U}_{A,N;(1-2)}^{(1)}. \quad (4)$$

Падение напряжения на участке (1–2) фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$

$$\Delta \underline{U}_{A,N;(1-2)}^{(1)} = \underline{I}_{A,(1-2)}^{(1)} \cdot \underline{Z}_{A,(1-2)} + \underline{I}_{N,(1-2)}^{(1)} \cdot \underline{Z}_{N,(1-2)}, \quad (5)$$

где  $\underline{Z}_{A,(1-2)}$ ,  $\underline{Z}_{N,(1-2)}$  – комплексные значения полных сопротивлений участка (1–2) для фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ .

Комплексные значения полных токов на участке (1–2)

$$\underline{I}_{A,(1-2)}^{(1)} = \frac{\dot{\underline{S}}_{A,(1-2)}^{n(1)}}{\underline{U}_{A,1}^{(1)}}. \quad (6)$$

Комплексное значение полных токов в нулевом рабочем проводнике  $N$  на участке (1–2) определяется как

$$\underline{I}_{N,(1-2)} = \underline{I}_{A,(1-2)} + \underline{I}_{B,(1-2)} + \underline{I}_{C,(1-2)}. \quad (7)$$

Далее последовательно рассчитываются напряжения остальных узлов схемы.

На этом первое приближение (итерация) расчета завершено. Для уточнения значений напряжений и мощностей производятся повторные расчеты с использованием более точных значений напряжений, полученных из предыдущей итерации (т. е. для второй итерации используются фазные напряжения из первой  $\underline{U}_n^{(1)}$ ).

Расчет повторяем до тех пор, пока разность между модулями напряжений  $\underline{U}_n$   $k$ -го и  $(k+1)$ -го приближений не будет превышать допустимую погрешность  $\varepsilon$ , которую принимаем равной 0,001:

$$\delta U_n = |U_n^{k+1} - U_n^k| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

### Особенности расчета режима с учетом высших гармоник

Функции, которые симметричны относительно оси абсцисс, раскладываются в ряд, не содержащий четных гармоник и постоянной составляющей. Таким образом, ток в осветительной линии будет содержать только нечетные гармоники.

Значения токов высших нечетных гармоник (от 3-й до 39-й) для светильников с лампами ДНаТ при наличии компенсации реактивной мощности представлены в табл. 1 [7]. На основе этих данных произведен расчет режимов осветительной линии с учетом высших нечетных гармоник.

Таблица 1

**Значения токов высших гармоник для светильников с лампами ДНаТ  
при наличии компенсации реактивной мощности  
(в процентах относительно тока основной (первой) гармоники)**

**The magnitudes of the high harmonic currents for luminaires  
with high pressure sodium lamps in the presence of reactive power compensation  
(in percent relative to the current of fundamental (first) harmonic)**

Номер высшей гармоники	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
Значение тока высшей гармоники, %	19	9,5	1-1,4	2,4-3	11	4,5-5,9	0,4-0,7	6,6-7,4	2,2-3,4	0,7-7,2	7-10	3-10	1-9	4,2-5,5	7,2-10,5	0,2	0,5-2	5-8,6	1,7-3,6

Если гармонике соответствует диапазон величин, в котором может находиться величина тока, то для проведения расчета принималось наибольшее значение (например, для 7-й гармоники ток равен 1,4 % от тока первой гармоники).



Гармоники, кратные трем (3-, 9-, 15-, 21-, 27-, 33-, 39-я), образуют систему векторов нулевой последовательности, совпадающих по фазе. К прямой последовательности относятся 1-, 7-, 13-, 19-, 25-, 31-, 37-я гармоники, к обратной – 5-, 11-, 17-, 23-, 29-, 35-я.

Расчет режимных параметров с учетом высших гармоник (варианты расчета *b* и *c*) аналогичен расчету без учета высших гармоник (вариант *a*) и осуществляется итерационным путем в два этапа (как указано выше).

На первом этапе рассчитываются мощности на всех участках. Мощности и токи светильников определяются на основании действующих значений напряжений.

Комплексное значение полного тока на участке (1–2)  $\underline{I}_{A,(1-2)}^{(1)}$  находится по формуле (6). Зная действующее значение  $I_{A,(1-2)}^{(1)}$ , на основании табл. 1 определены величины токов основной и высших гармоник.

Связь действующего значения с основной гармоникой для рассматриваемых светильников определяется как

$$\begin{aligned} I_{A,(1-2)}^{(1)} &= I_{1A,(1-2)}^{(1)} \sqrt{1 + 0,19^2 + 0,095^2 + 0,014^2 + 0,03^2 + 0,11^2 + 0,059^2 + \dots} = \\ &= I_{1A,(1-2)}^{(1)} \cdot 1,061. \end{aligned}$$

Значение тока основной (первой) гармоники

$$I_{1A,(1-2)}^{(1)} = \frac{I_{A,(1-2)}^{(1)}}{1,061}.$$

Значение тока третьей гармоники

$$I_{3A,(1-2)}^{(1)} = \frac{I_{A,(1-2)}^{(1)}}{1,061} \cdot 0,19.$$

Таким же образом определяются значения токов остальных гармоник на всех участках для каждой фазы и нулевого рабочего проводника рассматриваемой линии.

Комплексное значение полных токов в нулевом рабочем проводнике *N* на участке (1–2) для основной (первой) гармоники определяется как

$$\underline{I}_{N,(1-2)} = \underline{I}_{A,(1-2)} + \underline{I}_{B,(1-2)} + \underline{I}_{C,(1-2)}. \quad (9)$$

Аналогично определяется и для высших нечетных гармоник. Например, для третьей гармоники

$$\underline{I}_{3N,(1-2)} = \underline{I}_{3A,(1-2)} + \underline{I}_{3B,(1-2)} + \underline{I}_{3C,(1-2)}. \quad (10)$$

Действующие значения полных токов в нулевом рабочем проводнике *N* на участке (1–2) с учетом высших гармоник

$$I_{N,(1-2)} = \sqrt{I_{1N,(1-2)}^2 + I_{3N,(1-2)}^2 + I_{5N,(1-2)}^2 + \dots} \quad (11)$$

Характерные особенности имеет второй этап.

Протекание токов высших гармоник вызывает падение напряжений на отдельных участках сети и искажение синусоидальности напряжения.

Величина падения напряжения от протекания тока  $n$ -й гармоники на участке (1–2)

$$\begin{aligned} \Delta U_{(n)A,N;(1-2)}^{(1)} &= I_{(n)A,(1-2)}^{(1)} (R_{(n)A,(1-2)} + jnX_{(n)A,(1-2)}) + \\ &+ I_{(n)N,(1-2)}^{(1)} (R_{(n)N,(1-2)} + jnX_{(n)N,(1-2)}), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $n$  – номер гармоники.

В целях упрощения принимаем, что угол между током и напряжением для высших гармоник такой же, как и для основной.

Расчеты вариантов  $b$  и  $c$  проведены с определением потерь напряжения на участках линии (расчет варианта  $a$  без учета высших гармоник проводился по падению напряжения на участках схемы).

Действующее значение потерь напряжения на участке (1–2)

$$\Delta U_{A,N;(1-2)} = \sqrt{\Delta U_{1A,N;(1-2)}^2 + \Delta U_{3A,N;(1-2)}^2 + \Delta U_{5A,N;(1-2)}^2 + \dots} \quad (13)$$

Проводя расчет с учетом высших гармоник, определим напряжения в узлах схемы по потерям напряжения

$$U_{A,2}^{(1)} = U_{A,1}^{(1)} - \Delta U_{A,N;(1-2)}^{(1)}. \quad (14)$$

### Выбор сечения проводника

Результаты трех вариантов расчета представлены на рис. 4–6 в виде распределения напряжения в точках рассматриваемой схемы (рис. 1) для фазы  $C$ , где  $a$  – точка сети; 1 – распределение напряжения при площади сечения жилы кабеля  $S = 6 \text{ мм}^2$ ; 2 – при  $S = 10 \text{ мм}^2$ ; 3 – при  $S = 16 \text{ мм}^2$ ; 4 – при  $S = 25 \text{ мм}^2$ .

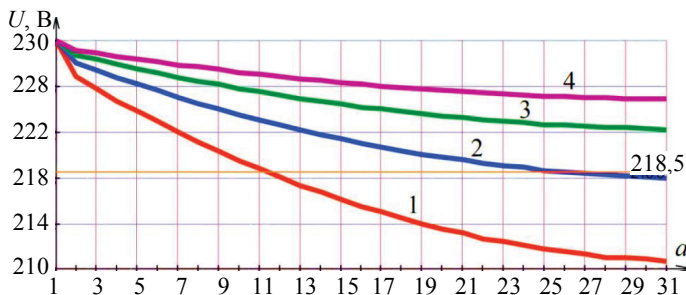


Рис. 4. Распределения напряжений в точках осветительной линии для фазы  $C$ , построенные при различных сечениях алюминиевых жил, без учета высших гармоник (вариант  $a$ )

Fig. 4. The graphs of the voltage levels distribution at the items of lighting line for the phase  $C$  for different sections of aluminum conductor without considering the high harmonics (variant  $a$ )

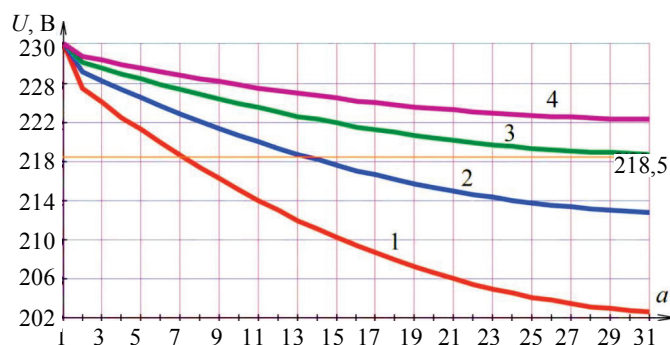


Рис. 5. Распределения напряжений в точках осветительной линии для фазы C, построенные при различных сечениях алюминиевых жил, с учетом высших гармоник, кратных трем (до 39-й) (вариант b);

Fig. 5. The graphs of the voltage levels distribution at the items of lighting line for the phase C for different sections of aluminum conductor with consideration the high harmonics multiple of 3 (up to 39<sup>th</sup> one) (variant b)

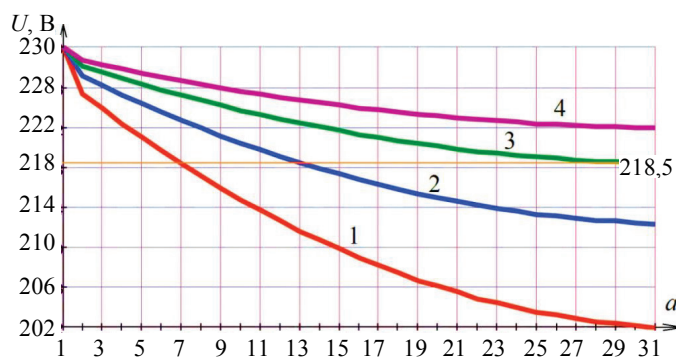


Рис. 6. Распределения напряжений в точках осветительной линии для фазы C, построенные при различных сечениях алюминиевых жил, с учетом высших гармоник до 39-й (вариант c);

Fig. 6. The graphs of the voltage levels distribution at the items of lighting line for the phase C for different sections of aluminum conductor with consideration the high harmonics up to the 39<sup>th</sup> one (variant c)

Условиями выбора сечения проводников осветительной линии наружного освещения определено расчетное отклонение напряжения в точках схемы не более 5 % от номинального напряжения сети [1] (в рассматриваемом примере – не менее  $230 \cdot 0,95 = 218,5$  В на наиболее удаленном светильнике). В соответствии с произведенными расчетами и их результатами (рис. 4–6, табл. 2) ближайшее сечение алюминиевой жилы кабеля, удовлетворяющее данному условию, зависит от варианта расчета и равно:

- 16 мм<sup>2</sup> – при вариантах расчета a и b;
- 25 мм<sup>2</sup> – при варианте c;
- 10 мм<sup>2</sup> – при расчете с учетом упрощений (1–3).

Таким образом, при проведении упрощенного расчета реальная величина напряжения на наиболее удаленном светильнике будет ниже допустимого уровня (табл. 2). По результатам расчета без упрощений и с учетом нечетных гармоник до 39-й включительно (вариант c) для обеспечения необходимого уровня напряжения на наиболее удаленном светильнике следует использовать сечение алюминиевой жилы кабеля, равное 25 мм<sup>2</sup>.

Таблица 2

**Расчетное значение напряжения на последнем светильнике для фазы C**  
**(наиболее удаленном от пункта питания)**  
**в зависимости от сечения жил кабеля осветительной линии**  
**The estimated value of the voltage in the last luminaire for the phase C**  
**(the most distant from the power point)**  
**depending on the cable cross section of the lighting line**

Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Расчетное значение напряжения на последнем светильнике для фазы C в зависимости от варианта расчета, В			
	Без учета высших гармоник	С учетом гармоник, кратных трем (до 39-й)	С учетом гармоник до 39-й	Упрощенный расчет
10	218,0	212,7	212,3	<b>219,2</b>
16	<b>222,2</b>	<b>218,7</b>	218,3	223,2
25	224,8	222,2	<b>221,9</b>	225,6

Кроме того, необходимо, чтобы величина потери напряжения на участке от пункта питания до ближайшего светильника не превышала 2,5 % [1]. В рассматриваемом примере напряжение на наименее удаленном светильнике должно быть не менее  $230 \cdot 0,975 = 224,2$  В.

Ближайший к первому пункту питания светильник подключен к фазе A, напряжения на нем при различных вариантах расчета режима представлены в табл. 3. Таким образом, данное условие выполняется во всех случаях.

Таблица 3

**Расчетное значение напряжения на первом светильнике для фазы A**  
**(ближайшем к пункту питания)**  
**в зависимости от сечения жил кабеля осветительной линии**  
**The estimated value of the voltage in the first luminaire for the phase A**  
**(nearest to power point) depending on the cable cross section of the lighting line**

Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Расчетное значение напряжения на первом светильнике для фазы A в зависимости от варианта расчета, В		
	Без учета высших гармоник	С учетом гармоник, кратных трем (до 39-й)	С учетом гармоник до 39-й
16	228,7	228,1	228,0
25	229,1	228,7	228,6

Определены также действующие значения токов в начале рассматриваемой линии. Значения токов на участке от пункта питания до первого светильника в зависимости от сечения жил кабеля для каждого варианта расчета приведены в табл. 4.

При упрощенном расчете ток в фазном проводнике равен 8,6 А.

Проверим сечение кабеля по нагреву. Расчетные значения полных токов в пункте питания, независимо от расчета, меньше допустимых токов кабелей с алюминиевыми жилами сечением 16 мм<sup>2</sup> ( $I_{\text{доп}} = 82,8$  А) и сечением 25 мм<sup>2</sup> ( $I_{\text{доп}} = 105,8$  А).

На основании полученных результатов расчетов определяющее влияние на величину токов в нулевом рабочем проводнике оказывают гармоники, кратные трем. Это необходимо учитывать при выборе сечения нулевых рабочих проводников. При несимметричном (неравномерном) распределении нагрузки по фазам возможны и большие токи в нулевом проводнике.

Таблица 4

**Действующие значения токов на участке от пункта питания  
до первого светильника для трех вариантов расчета  
в зависимости от сечения жил кабеля осветительной линии**

**The effective magnitudes of the currents in the section from the power point  
to the first luminaire for the three calculation variants  
depending on the cable cross section of the lighting line**

Действующее значение тока, А	Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Вариант расчета		
		Без учета высших гармоник	С учетом высших гармоник, кратных трём (до 39-й)	С учетом всех высших гармоник (до 39-й)
$I_{A,(1-2)}$	16	9,22	9,12	9,11
	25	9,28	9,21	9,20
$I_{B,(1-2)}$	16	9,19	9,09	9,08
	25	9,26	9,19	9,18
$I_{C,(1-2)}$	16	9,17	9,07	9,06
	25	9,25	9,17	9,16
$I_{N,(1-2)}$	16	0,09	5,84	5,84
	25	0,06	5,90	5,90

Таким образом, из представленных расчетов видно, что неучет высших гармоник при выборе сечений проводников осветительной линии приводит к занижению требуемых сечений жил. Следует иметь в виду также другие особенности влияния несинусоидальности на эксплуатационные параметры линии. Например, ПРА газоразрядных ламп содержат конденсаторы, поэтому может возникнуть резонанс, приводящий к снижению срока службы лампы и конденсатора. К тому же работа ПРА при несинусоидальности тока и напряжения приводит к повышенному шуму с широким спектром 50–8000 Гц [8], что является значимым для внутреннего освещения, в то время как для наружного уровень шума не регламентируется.

Важная особенность также – увеличение погрешности приборов учета электроэнергии, установленных в пунктах питания, поскольку приборы учета калибруются при чисто синусоидальном токе и напряжении [9]. Величина погрешности зависит от измерительной системы счетчика и частотной характеристики. От указанных недостатков свободны микропроцессорные системы учета, позволяющие отдельно учитывать энергию на разных частотах [10].

## ВЫВОДЫ

1. Протекание токов высших нечетных гармоник приводит к искажению синусоидальности напряжения, а также к повышению потерь напряжения. Поэтому для обеспечения бесперебойной работы источников света следует учитывать гармоники при выборе сечений жил кабелей в сети наружного освещения (т. е. применять кабели с большими сечениями жил).

2. Определяющее влияние на величину токов в нулевом рабочем проводнике оказывают гармоники, кратные трем.

3. При учете высших гармоник ток в нулевом рабочем проводнике сопоставим с током в фазных проводниках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-287-2013. Минск: Минстройархитектуры, 2013. 19 с.
2. 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.
3. Краснопольский, А. Е. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А. Е. Краснопольский, В. Б. Соколов, А. М. Троицкий; под общ. ред. А. Е. Краснопольского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.
4. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сатсукевич. Минск: Техноперспектива, 2011. 543 с.
5. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 2-е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 715 с.
6. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.
7. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
8. Ефимкина, В. Ф. Светильники с газоразрядными лампами высокого давления / В. Ф. Ефимкина, Н. Н. Софронов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
9. Арриллага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
10. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

Поступила 04.04.2017 Подписана в печать 06.06.2017 Опубликовано онлайн 28.11.2017

#### REFERENCES

1. TKP 45-4.04-287-2013. Outdoor Lighting of Cities, Settlements and Rural Settlements. Rules of Design. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2013. 19 (in Russian).
2. Kozlovskaya V. B., Kalechits V. N. (2013) The Influence of the Magnitude of the Voltage on the Mode of Operation of Outdoor Lighting Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 18–25 (in Russian).
3. Krasnopol'skii A. E., Sokolov V. B., Troitskii A. M. (1988) *Ballasts for Discharge Lamps*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 208 (in Russian).
4. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Satsukevich V. N. (2011) *Electric Lighting*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 543 (in Russian).
5. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2008) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 2<sup>nd</sup> ed. Rostov-on-Don, Fenix Publ. 715 (in Russian).
6. Aizenberg Yu. B. (ed.) (2006) *The Reference Book on Light Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Znak Publ. 972 (in Russian).
7. Zhezhelenko I. V. (2000) *Higher Harmonics in Power Supply Systems of Industrial Enterprises*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 331 (in Russian).
8. Efimkina V. F., Sofronov N. N. (1984) *Luminaires with Gas Discharge Lamps of High Pressure*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 104 (in Russian).
9. Arrillaga J., Bradley D., Bodzher P. (1990) *Harmonics in Electrical Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 320 (in Russian).
10. Zhelezko Yu. S. (2009) *Loss of Electricity. Reactive Power. Power Quality: a Guide for Practical Calculations*. Moscow, ENAS Publ. 456 (in Russian).

Received: 4 April 2017

Accepted: 6 June 2017

Published online: 28 November 2017