

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>

УДК 621.32

Несимметричные режимы работы линий наружного освещения

В. Б. Козловская¹⁾, В. Н. Калечиц¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Несимметричные режимы в сети наружного освещения могут быть вызваны отключением части светильников в целях экономии электроэнергии в ночное время суток, несимметрией напряжений в пунктах питания. Проанализированы возможные альтернативные симметричные режимы экономии электроэнергии для замены неполнофазной работы линии. Произведены расчеты симметричных и несимметричных режимов работы осветительной линии без и с учетом высших гармоник (до 39-й) с помощью программ, реализованных в MathCad. В качестве источников света в расчетах рассмотрены массово применяемые светильники с дуговыми натриевыми лампами высокого давления, подключенные через электромагнитную пускорегулирующую аппаратуру. Такие светильники являются источниками высших гармоник, искажают синусоидальность напряжения. Определены значения токов, мощностей, потерь мощностей, падения напряжения на всех участках рассматриваемой осветительной линии, напряжения на зажимах светильников для каждой фазы (режимные параметры). Представлены графики распределения напряжений в точках осветительной линии для рассматриваемых режимов работы. Рассчитан годовой расход электроэнергии осветительной линии при различных вариантах работы и произведено сравнение полученных результатов. При отказе от отключения части светильников в ночное время и использовании плавного перехода на пониженное напряжение (симметричное) в пункте питания или двухступенчатой пускорегулирующей аппаратуры неравномерность освещенности проявляется меньше при сопоставимом уровне электропотребления. Наличие несимметрии напряжений в пункте питания, как и отключение одной фазы, приводит к увеличению токов, потерь мощности и напряжения. Ток в нулевом рабочем проводнике может превышать токи в фазных проводниках (при расчете с учетом высших гармоник). Учет высших гармоник позволяет точнее определить режимные параметры, на основании которых можно найти расход электроэнергии.

Ключевые слова: наружное освещение, осветительная линия, светильник, несимметричные режимы, высшие гармоники, экономия электроэнергии

Для цитирования: Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 3. С. 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>

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
kalechyts@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
kalechyts@bntu.by

Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines

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

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

Abstract. Asymmetrical modes of the outdoor lighting network can be caused by disconnecting of a part of the luminaires in order to electrical energy savings at night; also – by asymmetry of voltage in power points. The possible alternative symmetric modes of energy saving to replace the incomplete-phase operation of the line have been analyzed. Calculations of various symmetric and asymmetric modes of the lighting line were carried out without taking into account and taking into account high harmonics up to the 39th one. Calculations have been performed with the programs of MathCad software. As light sources, in the calculations the widely used luminaires with high-pressure sodium arc lamps connected through electromagnetic start-up equipment were considered. Such luminaires are sources of high harmonics, and they distort the sinusoidal voltage. The values of currents, power, power loss, voltage drop in all areas of the lighting line, the voltage at the terminals of the lamps for each phase (operating parameters) are determined. The diagrams of the voltage distribution at the points of the lighting line are plotted for the considered modes of operation. The annual electric power consumption of the lighting line has been calculated for different variants of operation, and the obtained results have been compared. When refusing to disconnection of part of the luminaires at night and using a smooth transition to a lower voltage (symmetrical) at a power point or using two-stage ballast devices, uneven illumination appears less when the level of electricity consumption is comparable. The presence of voltage asymmetry at the power point, as well as the disconnection of one phase, leads to an increase in currents, power losses and voltage. The current in the zero working conductor can exceed the currents in the phase conductors (when calculated taking into account the higher harmonics). Accounting for higher harmonics allows one to determine the operating parameters more accurately, on the basis of which the electricity power consumption can be estimated.

Keywords: outdoor lightning, lighting line, luminaire, asymmetrical modes, high harmonics, electrical energy savings

For citation: Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2019) Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3) 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246> (in Russian)

Введение

В наружном уличном освещении нормируются средняя освещенность и средняя яркость [1], выбор которых определяется типом освещаемого пространства (дороги и улицы различных категорий, площади, пешеходные участки и т. д.). Для поддержания данных параметров во время работы осветительной сети в допустимых пределах необходимо обеспечивать соответствующие показатели качества электрической энергии.

В настоящее время в наружном освещении преимущественно используются газоразрядные натриевые лампы высокого давления типа ДНаТ. Широкое применение светодиодных светильников, несмотря на наличие ряда их преимуществ по сравнению с другими источниками света, затрудняется по причине их высокой стоимости. Газоразрядные лампы высокого давления являются источниками высших гармоник; особенности их учета в расчетах и влияние несинусоидальности на режим работы осветительной сети представлены в [2].

Рассмотрим причины возникновения устойчивых несимметричных режимов в сети наружного освещения, а также проанализируем изменение параметров линии в каждом случае на примере наиболее распространен-

ного варианта осветительной линии, представленной в [2]. Приведем описание данной линии уличного освещения: пункт питания, к которому подключена линия, расположен непосредственно в ТП 10/0,4 кВ. Для освещения используются светильники типа ЖКУ с лампой ДНаТ мощностью 150 Вт, подключенной через электромагнитный пускорегулирующий аппарат (ЭмПРА) (активная мощность, потребляемая светильником с учетом потерь в ЭмПРА, $P_{\text{ном}} = 170$ Вт) с импульсным зажигающим устройством и компенсирующим конденсатором ($\cos\varphi_n = 0,86$), номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В. Удаленность пункта питания до ближайшей опоры 80 м. Расстояние между опорами 25 м, число опор 30, на одной опоре один светильник. Для питания светильников применяется кабель с алюминиевыми жилами, проложенный в земле. Распределение светильников между фазами $A-B-C-A-B-C$, подключены симметрично. В осветительной сети используется глухозаземленная нейтраль в виде системы $TN-S$ (с разделением нулевого проводника на рабочий и защитный). В [2] показано, что с учетом индуктивного сопротивления проводника, высших гармоник и влияния напряжения на световой поток лампы, ток и активную мощность, потребляемую светильником, сечение питающего кабеля должно быть существенно увеличено. Для данной линии необходимая площадь сечения алюминиевой жилы кабеля составила 25 мм^2 [2].

В общем случае несимметричная работа осветительных линий может быть вызвана:

- 1) неполнофазным режимом работы, связанным с переходом от вечернего режима к ночному;
- 2) различным количеством и мощностью светильников, подключенных к каждой фазе;
- 3) несимметрией напряжений в пункте питания.

Работа линий наружного освещения может сопровождаться сочетанием нескольких из вышеперечисленных причин несимметрии. Кроме того, несимметричность может быть обусловлена повреждением линии (обрыв или короткое замыкание, приводящие к неполнофазной работе).

Расчет параметров режима заключается в определении значений токов, мощностей, падения напряжения на всех участках рассматриваемой осветительной линии, напряжений во всех точках линии для каждой фазы. В системе автоматизированного проектирования MathCad реализованы программы, позволяющие производить расчеты режимных параметров осветительной линии с и без учета высших гармоник. Расчет режима осветительной линии производился методом последовательных приближений [3], подробное описание методики расчета и схема приведены в [2, 4].

Переход к ночному режиму работы

В период снижения интенсивности движения транспорта и активности населения в ночное и утреннее темное время суток с целью экономии электроэнергии могут отключаться одна или две фазы сети, питающей светильники. Это вызывает ухудшение качества освещения, приводящее к появлению значительной неравномерности освещенности. Такой режим регламентируется согласно [1] и широко используется. Частичное отключение наружного освещения при нормируемой средней яркости

более $0,4 \text{ кд/м}^2$ или средней освещенности более 4 лк производится путем выключения не более половины светильников [1]. При этом не допускается отключение двух подряд светильников, а также светильников, которые расположены вблизи ответвления, примыкания, пешеходных переходов, остановок общественного транспорта, вершины кривой в продольном профиле радиусом менее 300 м, на кривой радиусом менее 100 м [5].

Допускается также снижать уровень освещенности (не ниже 50 % от нормируемого значения согласно [1]) с помощью регуляторов в зависимости от степени уменьшения интенсивности движения. Примером такого регулирования является плавное снижение напряжения до уровня, при котором не будет происходить погасание ламп. Такое понижение должно осуществляться при условии, что зажигание ламп (пусковой режим) производится при номинальном напряжении. Для ламп ДНаТ возможно снижение мощности до 50 % от номинальной [6], не оказывая влияния на цветовые характеристики и срок службы. Напряжение на зажимах светильника, при котором происходит погасание лампы ДНаТ, может составлять 110–190 В (в зависимости от мощности, исполнения лампы). Лампа не должна гаснуть при падении напряжения в течение 0,5 с от 100 до 90 % расчетного значения и его воздействии в течение не менее 0,5 с [7]. Предельное максимальное значение питающего напряжения для работы ламп мощностью 150 Вт и более с ЭмПРА должно быть равно расчетному напряжению ЭмПРА + 10 В [7]. Если расчетное напряжение ЭмПРА равно 220 В, то предельное соответственно 230 В. При этом допускается только кратковременная работа светильников выше данной предельной величины.

Для описанной осветительной линии рассмотрены симметричный режим без экономии электроэнергии, а также четыре режима с пониженным расходом электроэнергии:

- а) симметричный режим работы с напряжением 230 В в трех фазах пункта питания;
- б) несимметричный режим, вызванный отключением фазы *A*, напряжение в фазах *B*, *C* в пункте питания 230 В;
- с) режим работы без отключения светильников, реализуемый понижением фазных напряжений в пункте питания до 215 В;
- д) режим работы без отключения светильников, реализуемый понижением фазных напряжений в пункте питания до 205 В;
- е) режим работы светильников со снижением активной мощности на 40 % с помощью двухступенчатых ЭмПРА (напряжение в пункте питания – 230 В).

Симметричные режимы *c*, *d*, *e* приведены как альтернативные варианты несимметричному режиму *b*.

Переход на режим пониженной мощности путем плавного снижения напряжения в пункте питания (*c*, *d*) может производиться для уже существующих осветительных линий с газоразрядными лампами, так как не требует замены элементов светильников. Необходимо учитывать, что при резком снижении напряжения происходит погасание ламп. Кроме того, частые погасания и работа ламп на напряжениях, отличающихся от номинальных, приводят к сокращению срока службы газоразрядных ламп.

Оценка снижения срока службы ламп – многокритериальная задача, которая определяется конструктивными особенностями, типом и мощ-

ностью ламп, величиной снижения напряжения, длительностью и режимом работы.

Осуществлено сравнение данных режимов при рассмотрении распределения напряжений в точках осветительной линии, величины мощностей и токов в пункте питания, а также суммарных потерь мощности в линии. Расчеты режимов произведены двумя способами:

1) без учета высших гармоник;

2) с учетом высших гармоник до 39-й включительно. Подробное описание методики расчетов с учетом высших гармоник приведено в [2].

Если производить аналогичные расчеты для линии с площадью сечения алюминиевой жилы кабеля, равной 16 мм^2 (такое сечение получено расчетом линии без учета высших гармоник), то будет наблюдаться большая величина падения напряжения в точках рассматриваемой линии по сравнению с результатами, представленными в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Графически распределение напряжения в точках рассматриваемой линии, содержащей 30 светильников, на примере фазы *C* для пяти режимов работы (*a, b, c, d, e*) представлено на рис. 1 и 2, где *A* – точка сети.

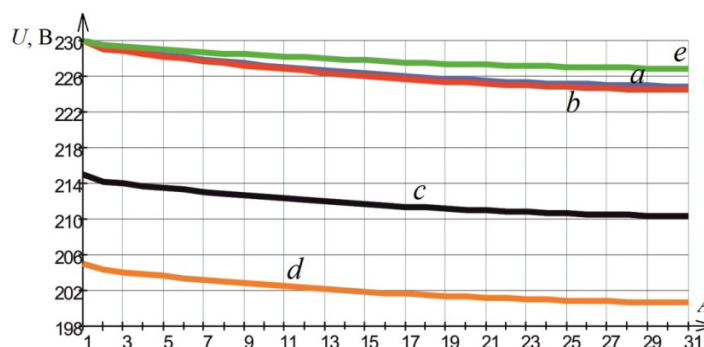


Рис. 1. Распределение напряжения в точках осветительной линии для фазы *C* при различных режимах работы без учета высших гармоник

Fig. 1. The graphs of the voltage levels distribution at the items of lighting line for phase *C* for different modes without considering the high harmonics

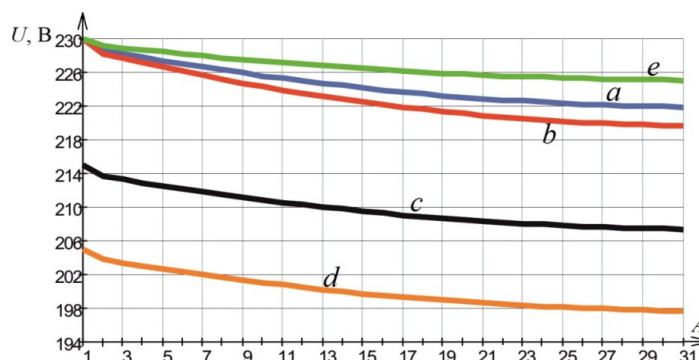


Рис. 2. Распределение напряжения в точках осветительной линии для фазы *C* при различных режимах работы с учетом высших гармоник

Fig. 2. The graphs of the voltage levels distribution at the items of lighting line for phase *C* for different modes with considering the high harmonics

Таблица 1

Результаты расчета параметров осветительной линии в режимах *a-e* без/с учетом высших гармоник до 39-й включительно
The calculation results of the parameters of the lighting line in modes of *a-e* without/with considering the high harmonics up to the 39th one inclusive

Параметр режима	Режим работы				
	<i>a)</i> симметричный	<i>b)</i> несимметричный (фаза <i>A</i> отключена)	<i>c)</i> с пониженным напряжением до 215 В	<i>d)</i> с пониженным напряжением до 205 В	<i>e)</i> понижение мощности на 40 % с помощью ЭМПРА
Напряжение в фазах пункта питания, В:					
<i>A</i>	230	0	215	205	230
<i>B</i>	230	230	215	205	230
<i>C</i>	230	230	215	205	230
Напряжение на наиболее удаленном светильнике фазы <i>C</i> , В	224,8/221,9	224,5/219,7	210,3/207,4	200,7/197,7	226,9/225,1
Активная мощность на наиболее удаленном светильнике фазы <i>C</i> , Вт	181,6/174,5	180,7/169,4	153,6/148,6	137,1/133,2	111,9/109,3
Световой поток наиболее удаленного светильника фазы <i>C</i> , выраженный в процентах по отношению к номинальному, %	105,0/102,0	104,5/99,9	88,5/85,0	78,0/75,0	≈50
Активная мощность в фазах пункта питания, Вт:					
<i>A</i>	1902,0/1851,5	0/0	1598,3/1562,8	1428,8/1396,0	1150,3/1132,0
<i>B</i>	1890,8/1842,0	1826,7/1802,0	1591,4/1557,1	1422,1/1391,8	1146,1/1128,6
<i>C</i>	1886,8/1883,3	1879,6/1792,4	1589,4/1551,7	1420,5/1387,7	1144,6/1125,3
Суммарное значение Σ , Вт	5679,6/5576,8	3706,3/3594,4	4779,1/4671,6	4271,4/4175,5	3441,0/3385,9
Реактивная мощность в фазах пункта питания, вар:					
<i>A</i>	974,7/987,3	0/0	973,1/964,0	941,4/933,6	582,2/587,1
<i>B</i>	978,4/990,5	994,2/1000,0	970,5/962,4	940,3/931,1	581,5/586,0
<i>C</i>	980,2/993,4	982,1/1002,5	969,3/960,9	940,0/928,3	580,1/584,8
Суммарное значение Σ , вар	2933,3/2971,2	1976,3/2002,5	2912,9/2887,3	2821,7/2793,0	1743,8/1757,9

Окончание табл. 1

Параметр режима	Режим работы				
	а) симметричный	б) несимметричный (фаза А отключена)	с) с пониженным напряжением до 215 В	д) с пониженным напряжением до 205 В	е) понижение мощности на 40 % с помощью ЭМПРА
Комплексное значение суммарных потерь полной мощности для каждой фазы и нулевого проводника, В·А: А В С N	(31,6 + j1,7)/ (30,6 + j1,6) (34,0 + j1,8)/ (33,0 + j1,7) (36,6 + j1,9)/ (35,5 + j1,9) (0,5 + j0)/ (14,2 + j0,7)	0/0 (32,8 + j1,7)/ (32,3 + j1,7) (36,5 + j1,9)/ (34,6 + j1,8) (32,1 + j1,7)/ (39,0 + j2,1)	(27,7 + j1,5)/ (26,9 + j1,4) (29,8 + j1,6)/ (29,0 + j1,5) (32,1 + j1,7)/ (31,1 + j1,7) (0,5 + j0)/ (12,5 + j0,7)	(25,5 + j1,4)/ (24,7 + j1,3) (27,5 + j1,5)/ (26,7 + j1,4) (29,6 + j1,6)/ (28,7 + j1,5) (0,4 + j0)/ (11,5 + j0,6)	(11,5 + j0,6)/(11,3 + j0,6) (12,4 + j0,6)/(12,2 + j0,6) (13,4 + j0,7)/(13,1 + j0,7) (0,2 + j0)/ (5,2 + j0,3)
	(102,7 + j5,4)/ (113,3 + j5,9)	(101,4 + j5,3)/ (105,9 + j5,6)	(90,1 + j4,8)/ (99,5 + j5,3)	(83,0 + j4,5)/ (91,6 + j4,2)	(37,5 + j1,9)/ (41,8 + j2,2)
	1,8/2,0	2,7/2,9	1,9/2,1	1,9/2,2	1,1/1,2
	9,28/9,20 9,26/9,18 9,25/9,16 0,06/5,90	0/0 9,15/9,11 9,24/9,09 8,85/9,74	8,69/8,62 8,67/8,60 8,66/8,58 0,04/5,53	8,34/8,27 8,32/8,25 8,31/8,24 0,04/5,30	5,60/5,57 5,59/5,56 5,58/5,55 0,02/3,57
	Примечание. Номинальное напряжение светильников 220 В. В режиме понижения мощности с помощью двухступенчатых ЭМПРА зависимости тока и активной мощности от напряжения принимались со снижением значений на 40 %.				

На основании представленных результатов расчетов имеются следующие выводы:

1) большее падение напряжения при неполнофазном режиме работы (*b*) по сравнению с симметричным режимом (*a*) объясняется увеличением величины тока в нулевом проводнике, причем при расчете с учетом высших гармоник ток в нулевом проводнике N превышает значение тока в фазах. В симметричных режимах (*a*, *c*, *d*, *e*) при расчете без учета высших гармоник ток в нулевом проводнике N близок к нулю, при расчете с учетом высших гармоник ток в нулевом проводнике N несколько меньше значения фазного тока. В связи с этим сечение нулевого проводника необходимо выбирать исходя из того, что ток в нулевом проводнике сопоставим с фазными токами, и с учетом возможных несимметричных режимов;

2) учет высших гармоник позволяет более точно оценить реальное напряжение в точках линии (рис. 1, 2);

3) в табл. 1 приведены суммарные потери активной мощности в линии относительно активной мощности пункта питания, при этом наибольшие потери (2,7 / 2,9 %) соответствуют несимметричному режиму *b*.

Используя полученные результаты, оценена эффективность различных способов экономии электроэнергии на примере данной линии.

Для г. Минска годовое время работы освещения приблизительно равно 3800 ч, из которых 2000 ч относится к вечернему режиму работы, а 1800 ч – к ночному (принимаемое в расчетах время подробно указано ниже при перечислении вариантов работы рассматриваемой осветительной линии).

Зная величину потребляемой мощности в пункте питания (табл. 1) и время работы в соответствующем режиме, рассчитан годовой расход электроэнергии осветительной линии при различных вариантах работы:

I) без перехода на экономию электроэнергии ($T = 3800$ ч);

II) с отключением светильников одной фазы в ночном режиме ($T_{\text{вечерний}} = 2000$ ч; $T_{\text{ночной}} = 1800$ ч);

III) с понижением напряжения до 215 В в пункте питания в ночном режиме ($T_{\text{вечерний}} = 2000$ ч; $T_{\text{ночной}} = 1800$ ч);

IV) с понижением напряжения до 205 В в пункте питания в ночном режиме ($T_{\text{вечерний}} = 2000$ ч; $T_{\text{ночной}} = 1800$ ч);

V) с двухступенчатым понижением напряжения в пункте питания в ночное время ($T_{\text{вечерний}} = 1600$ ч; $T_{\text{ночной1}} = 1200$ ч; $T_{\text{ночной2}} = 1000$ ч);

VI) с понижением активной мощности на 40 % в ночном режиме, применяя двухступенчатые ЭМПРА ($T_{\text{вечерний}} = 2200$ ч; $T_{\text{ночной}} = 1600$ ч).

Сочетание режимов работы (из табл. 1) и время работы для каждого варианта представлены в табл. 2. Вместо отключения части светильников (II) рассмотрены варианты работы осветительной линии III, IV, V, VI. Результаты определения годового расхода электроэнергии осветительной линии сведены в табл. 2 для двух способов расчета (без/с учетом высших гармоник).

Проведем анализ результатов, представленных в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 2

**Годовой расход электроэнергии осветительной линии
при различных вариантах работы (без/с учетом высших гармоник)**
**Annual electric power consumption of the lighting line
with different variants of operation (without/with considering high harmonics)**

Вариант работы (режим и время включения)	Годовой расход электроэнергии W , кВт·ч	Экономия электроэнергии относительно I варианта работы, %
I) $a - 3800$ ч	21582,5/21191,8	
II) $a - 2000$ ч; $b - 1800$ ч	18030,5/17623,5	16,4/16,8
III) $a - 2000$ ч; $c - 1800$ ч	19961,6/19562,5	7,5/7,7
IV) $a - 2000$ ч; $d - 1800$ ч	19047,7/18669,5	11,7/11,9
V) $a - 1600$ ч; $c - 1200$ ч; $d - 1000$ ч	19093,7/18704,3	11,5/11,7
VI) $a - 2200$ ч; $e - 1600$ ч	18000,7/17686,4	16,6/16,5

По результатам табл. 2 видно, что имеет место снижение расхода электроэнергии линии при расчете с учетом высших гармоник по сравнению с расчетом без их учета. Это связано с большим падением напряжения в точках осветительной линии, обусловленным токами высших гармоник. От величины напряжения на зажимах светильника зависит потребляемая мощность (расход электроэнергии).

Наибольшая экономия электроэнергии наблюдается при отключении одной фазы (II, табл. 2) и при режиме работы линии на пониженной мощности светильников с двухступенчатыми ЭМПРА (VI, табл. 2). В первом случае проявляется значительная неравномерность освещенности, а во втором наблюдается снижение освещенности примерно в два раза. Также вариант работы VI при одинаковом расходе электроэнергии (по сравнению с II) позволяет увеличить время работы в вечернем режиме.

Светильники линии, которая эксплуатируется с переходом на ночной режим путем отключения фазы, будут неравномерно выходить из строя, что имеет значение, в том числе, при обслуживании линии. Зачастую такое регулирование не может быть целесообразным из-за снижения безопасности дорожного движения, что несопоставимо со снижением расхода электроэнергии. Однако в отдельных случаях можно рассматривать вариант работы с отключением каждого второго светильника. Главными достоинствами экономии электроэнергии путем отключения одной из фаз (режим II) являются простота реализации и отсутствие необходимости установки дополнительного оборудования.

Применение двухступенчатых ЭМПРА с возможностью понижения мощности (отличаются от обычных ЭМПРА тем, что имеют две обмотки электромагнитного дросселя, переключатель мощности с настраиваемым таймером) позволяет автоматически снижать мощность в заданные промежутки времени до 50 %. Однако следует учитывать, что на показатели освещенности и яркости влияет величина светового потока применяемых источников света. Снижение уровня напряжения на зажимах светильника

приводит к уменьшению светового потока и ухудшению качества освещения.

При использовании регулирования напряжения в пункте питания (III, IV, V, табл. 2) и переходе на работу светильников на пониженной мощности с помощью двухступенчатого ЭМПРА (VI, табл. 2) не происходит отключение светильников и соответственно неравномерность освещенности проявляется в меньшей мере. Но при этом требуется установка дополнительного оборудования для регулирования светового потока источников света (в отличие от экономии электроэнергии путем отключения фаз).

Двухступенчатое регулирование напряжения в пункте питания (V) позволяет плавно уменьшить мощность и световой поток светильников в отличие от варианта работы IV. Количество ступеней может быть и большим, например, ступени через 10 В со снижением напряжения до 165–175 В. Переход на соответствующую ступень напряжения в пункте питания должен происходить плавно, иначе может случиться погасание ламп линии.

При варианте работы III электропотребление осветительной линии больше, чем в других рассматриваемых режимах с экономией электроэнергии. Но световой поток наиболее удаленного светильника составляет примерно 85 % от номинального (при расчете с учетом высших гармоник), поэтому нет значительного ухудшения уровня освещенности.

Рассмотренные варианты работы сети наружного освещения позволяют организовать ее работу в зависимости от активности населения города (загруженности дорог) с разной степенью ухудшения качества освещения, обеспечивая возможность экономии электроэнергии.

Работа линии с различным количеством и мощностью светильников, подключенных к каждой фазе

Такая ситуация может быть обусловлена решениями, заложенными на стадии проектирования, а также выходом из строя части светильников.

Одной из особенностей линий наружного освещения является выполнение их по всей длине кабелем одинакового сечения. В зависимости от конфигурации освещаемого пространства (например, улицы) возможно исполнение осветительной линии, при котором расстояния между точками присоединения светильников отличаются (шаг между светильниками различный), т. е. сопротивления участков линии неодинаковые. Падения напряжения на отдельных участках линии для каждой из фаз будут отличаться пропорционально длине этих участков. Но в общем случае такая несимметричность в малой мере скажется на параметрах осветительной линии, поскольку длина осветительных линий обычно не превышает нескольких сотен метров (до одного километра).

На практике могут присутствовать разветвленные линии, а также возможно использование в одной осветительной линии различных источников света (как по мощности, так и по типу).

Еще одной причиной неравномерной нагрузки по фазам является наличие неполнофазных участков (двух- и однофазных), создающих неравномерность загрузки в пунктах питания.

Оперативное выявление вышедших из строя светильников (перегоревших ламп, ПРА и т. д.) на практике производится объездом территории и осмотром осветительных установок. Также применение современных автоматизированных систем управления наружным освещением позволяет контролировать состояние светильников, находить повреждения в осветительных сетях.

При спроектированном равномерном распределении светильников между фазами возможная несимметрия от перегорания ламп нескольких светильников будет незначительно сказываться на режиме работы осветительной линии.

Осветительные сети постоянно развиваются за счет введения новых линий, а также модернизации уже существующих. Поэтому более важен вопрос равномерного распределения нагрузки в пунктах питания и их питающих трансформаторных подстанциях.

Несимметрия напряжений в пункте питания

Питание сетей наружного освещения осуществляется от трансформаторных подстанций, основную долю нагрузки которых составляют силовые электроприемники. Напряжение в пункте питания (начале осветительных линий) зависит от напряжения в фазах трансформатора. При этом силовая нагрузка может оказывать негативное влияние на параметры качества электроэнергии: увеличение отклонений напряжения, искажение синусоидальности напряжения, появление несимметрии напряжений, перенапряжений и провалов напряжения и др.

Возникающие в сети провалы напряжения являются причиной погасания газоразрядных высокого давления ламп. Время повторного зажигания лампы типа ДНаТ составляет до 3 мин (в общем случае – около 1 мин). Это время определяется временем остывания разрядной трубки до температуры, при которой подаваемые импульсы напряжения достаточны для повторного зажигания разряда [8]. Частота возникновения провалов напряжения зависит от электроприемников (особенно мощных), подключенных к той же трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, что и рассматриваемая осветительная линия, и от коротких замыканий, возникающих в электрических сетях и установках, подключенных к данной трансформаторной подстанции. Частые погасания и зажигания газоразрядных ламп, как и появление перенапряжений в осветительной линии, сказываются на их сроке службы.

Работа наружного освещения определяется графиком включений и отключений в зависимости от дня, месяца. Включение газоразрядных ламп сопровождается пусковым режимом, который характеризуется увеличением тока и большим уменьшением напряжения. Длительность такого режима – до 5–7 мин (в зависимости от исполнения и мощности лампы, конструкции ПРА и уровня напряжения на зажимах). Напряжение на зажимах светильника определяет возможность зажигания (в том числе повторного). Если реальное напряжение не менее 90 % от номинального ПРА, то зажигание лампы гарантированно будет происходить. Если на момент включения осветительной линии напряжение в пункте питания значительно

меньше номинального, то в зависимости от параметров линии не будет зажигания некоторых газоразрядных ламп.

Величина отклонения напряжения от номинального значения в точках осветительной линии зависит от графика электрических нагрузок, схемы сети. Для обеспечения заявленного срока службы лампы, указанного заводом-изготовителем, необходимо, чтобы отклонение напряжения $U_{\text{ном}}$ находилось в пределах $\pm 3\%$. Из анализа конкретных режимов работы осветительной линии (рис. 1, 2) видно, что на зажимах части светильников не обеспечивается выполнение данного условия. В этом случае можно подобрать ЭМПРА в соответствии с уровнем напряжения в конкретной точке осветительной линии, т. е. использовать ЭМПРА с номинальными напряжениями 220 или 230 В.

Также при значительном отклонении напряжения необходимо предусматривать средства регулирования и стабилизации напряжения для обеспечения нормальной работы освещения [9].

В целом наличие информации о величинах напряжения в течение года в пункте питания позволяет оперативно корректировать режим работы осветительной линии и оценивать эффективность каждого решения.

Совпадение графиков нагрузок отдельных мощных силовых электроприемников и осветительной нагрузки является причиной увеличения отрицательного отклонения напряжения, а в случае неравномерного распределения силовой нагрузки по фазам работа осветительной линии будет сопровождаться несимметрией напряжений.

На примере рассмотренной выше осветительной линии рассчитаны режимные параметры (табл. 3) некоторых несимметричных режимов работы:

1) в фазе B напряжение номинальное, в фазе A отклонение от номинального напряжения составляет $+10\%$; в фазе C – $(-10)\%$;

2) в фазе B напряжение номинальное, в фазе A отклонение от номинального напряжения составляет $+5\%$; в фазе C – $(-5)\%$;

3) фаза A отключена, в фазе B отклонение от номинального напряжения составляет $+10\%$; в фазе C напряжение номинальное.

Показателями качества электроэнергии, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} . Указанные в табл. 3 коэффициенты несимметрии найдены методом симметричных составляющих по формулам:

$$K_{2U} = U_2 / U_1; \quad (1)$$

$$K_{0U} = U_0 / U_1. \quad (2)$$

Комплексные значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$U_1 = (U_A + aU_B + a^2U_C) / 3; \quad (3)$$

$$U_2 = (U_A + a^2U_B + aU_C) / 3; \quad (4)$$

$$U_0 = (U_A + U_B + U_C)/3, \quad (5)$$

где $a = e^{j2\pi/3}$.

Приведенные коэффициенты нормируются [10]: осредненные значения коэффициентов K_{2U} , K_{0U} в интервале времени 10 мин не должны превышать 2 % в течение 95 % времени за одну неделю; не должны превышать 4 % в течение 100 % времени за одну неделю. Несимметрия напряжений нормируется для трехфазных сетей. Из табл. 3 видно, что режим 1 не соответствует нормам по несимметрии. Если рассматривать режим 2 с $K_{2U} = K_{0U} = 2,9$ % в течение 100 % времени работы линии, то и в этом случае нет соответствия указанным нормам по несимметрии. Для режима 3 коэффициенты рассчитаны как для трехфазной сети.

При сравнении режимов с отключением одной фазы при одинаковом (b , табл. 1) и с разным напряжением в других фазах (табл. 3) видно, что во втором случае имеют место большие значения потребляемой мощности, потерь мощности, причем в нулевом проводнике даже выше, чем в фазном.

Таблица 3

Результаты расчета режимных параметров осветительной линии при несимметрии напряжений в пункте питания без/с учетом высших гармоник до 39-й включительно
The calculation results of the mode parameters of the lighting line with asymmetry of voltage at the power point without/with considering the high harmonics up to the 39th one inclusive

Параметр режима	Режим работы		
	1	2	3
Напряжение в фазах пункта питания, В:			
<i>A</i>	253	241,5	0
<i>B</i>	230	230	253
<i>C</i>	207	218,5	230
Напряжение на наиболее удаленном светильнике фазы <i>C</i> , В	204,0/200,2	214,5/211,1	224,3/218,9
Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности для фазы <i>A</i> , В	$U_{A1} = 230e^{j0}$ $U_{A2} = 13,3e^{j30}$ $U_{A0} = 13,3e^{-j30}$	$U_{A1} = 230e^{j0}$ $U_{A2} = 6,6e^{-j150}$ $U_{A0} = 6,6e^{j150}$	$U_{A1} = 161e^{j0}$ $U_{A2} = 80,8e^{j175,3}$ $U_{A0} = 80,8e^{-j175,3}$
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U}	5,8	2,9	50,2
Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U}	5,8	2,9	50,2
Активная мощность в фазах пункта питания, Вт:			
<i>A</i>	2425,7/2387,2	2168,2/2124,0	–
<i>B</i>	1879,2/1828,1	1884,6/1835,6	2353,9/2328,0
<i>C</i>	1472,9/1423,7	1658,4/1614,9	1876,8/1779,4
Суммарное значение Σ , Вт	5777,8/5639,0	5711,2/5574,5	4230,7/4107,4
Реактивная мощность в фазах пункта питания, вар:			
<i>A</i>	768,4/790,9	990,7/977,2	–
<i>B</i>	981,3/993,8	979,9/992,0	811,7/825,7
<i>C</i>	947,3/940,5	898,9/912,2	982,8/1003,2
Суммарное значение Σ , вар	2697,0/2725,2	2869,5/2881,4	1794,5/1828,9

Окончание табл. 3

Параметр режима	Режим работы		
	1	2	3
Потери активной и реактивной мощности для каждой фазы и нулевого проводника, В·А:			
<i>A</i>	(37,1 + j1,9)/ (36,4 + j1,9)	(34,6 + j1,8)/ (33,7 + j1,8)	–
<i>B</i>	(33,8 + j1,8)/ (32,8 + j1,7)	(33,9 + j1,8)/ (32,9 + j1,7)	(38,9 + j2,1)/ (38,4 + j2,0)
<i>C</i>	(30,5 + j1,6)/ (29,3 + j1,5)	(33,4 + j1,8)/ (32,2 + j1,7)	(36,4 + j1,9)/ (34,3 + j1,8)
<i>N</i>	(2,8 + j0,1)/ (16,3 + j0,9)	(0,9 + j0,1)/ (14,5 + j0,8)	(45,7 + j2,4)/ (52,6 + j2,8)
Суммарное значение Σ, В·А	(104,2 + j5,4)/ (114,8 + j6,0)	(102,8 + j5,5)/ (113,3 + j6,0)	(121,0 + j6,4)/ (125,3 + j6,6)
Суммарные потери активной мощности относительно активной мощности пункта питания Σ, %	1,8/2,0	1,8/2,0	2,9/3,0
Ток в пункте питания для каждой фазы и нулевого проводника, А:			
<i>A</i>	10,07/10,02	9,72/9,65	–
<i>B</i>	9,24/9,16	9,25/9,17	9,97/9,94
<i>C</i>	8,42/8,32	8,82/8,72	9,23/9,07
<i>N</i>	2,85/6,52	1,47/6,07	10,60/11,34

Из сопоставления режимов 1 и 2 можно сделать вывод, что чем больше коэффициенты несимметрии, тем выше токи в проводниках, потери напряжения и мощности. Кроме того, при эксплуатации осветительной линии в несимметричном режиме имеет место неравномерность выхода из строя светильников. Это объясняется различным количеством часов работы в течение суток, а также разными напряжениями на самих светильниках.

ВЫВОДЫ

1. Расчет режимов сети наружного освещения с учетом высших гармоник позволяет более точно определить напряжения на зажимах светильников, а также расход электроэнергии.

2. Неполнофазный режим работы осветительной линии, вызванный отключением части светильников для экономии электроэнергии, сопровождается значительной неравномерностью освещенности. Ток в нулевом проводнике сопоставим с фазными токами (при расчете с учетом высших гармоник превышает фазный). Кроме этого, наблюдается увеличение потерь мощности и напряжения по сравнению с симметричными режимами.

3. Варианты экономии электроэнергии без отключения светильников позволяют избежать значительной неравномерности освещенности и минимизировать потери электроэнергии в линии, но требуют установки дополнительного оборудования (регулирование напряжения в пункте питания, использование двухступенчатых электромагнитных пускорегулирующих аппаратов).

4. Работа линии при обеспечении симметрии напряжению минимизирует падение напряжения, потери мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-153–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 100 с.
2. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
3. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 2-е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 715 с.
4. 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.
5. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-287–2013 (02250). Введ. 01.01.2014. Минск: Минстройархитектуры, 2013. 19 с.
6. Wout van Bommel. Road Lighting. Fundamentals, Technology and Application / Springer International Publishing AG, 2015. 334.
7. Лампы натриевые высокого давления. Эксплуатационные требования: ГОСТ Р 53073–2008. Введ. 01.07.2009. М.: Стандартиформ, 2009. 35 с.
8. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.
9. Кунгс, Я. А. Автоматизация управления электрическим освещением / Я. А. Кунгс. М.: Энергоатомиздат, 1989. 112 с.
10. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.07.2014. Минск: Госстандарт, 2015. 16 с.

Поступила 05.12.2018 Подписана в печать 26.02.2019 Опубликована онлайн 30.05.2019

REFERENCES

1. TCP 45-2.04-153–2009 (02250). *Natural and Artificial Lighting. Construction Design Codes*. Minsk, Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2010. 100 (in Russian).
2. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
3. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2008) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 2nd ed. Rostov-on-the-Don, Fenix Publ. 715 (in Russian).
4. Kozlovskaya V. B., Kalechits V. N. (2013) Influence of Voltage Value on Operational Mode of Outdoor Lighting Grid Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 18–25 (in Russian).
5. TCP 45-4.04-287–2013 (02250). *Outdoor Lighting of Cities, Towns and Rural Settlements. Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2013. 19 (in Russian).
6. Wout van Bommel (2015) Road Lighting. *Fundamentals, Technology and Application*. Springer International Publishing AG. 334. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11466-8>.
7. State Standard R 53073–2008. *High Pressure Sodium Lamps. Operational Requirements*. Moscow, Standartinform, 2009. 35 (in Russian).
8. Aizenberg Yu. B., Klyuev S. A., Gutorov M. M., Krol' ts. I., Rokhlin G. N., Sarychev G. S., Sofroyaov N. N., Tsiperman L. A. (2006) *The Reference Book on Light Engineering*. 3rd ed. Moscow, Znak Publ. 972 (in Russian).
9. Kungs Ya. A (1989) *Automation of Electric Lighting Control*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 112 (in Russian).
10. State Standard 32144–2013. *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Regulations of Quality of Electric Energy in Power Supply Systems of General Purpose*. Minsk, Gosstandart Publ. 16 (in Russian).

Received: 5 December 2018

Accepted: 26 February 2019

Published online: 30 May 2019