

дования надежности больших систем энергетики. – Вып. 62: Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения / отв. ред. Н. И. Воропай, В. А. Савельев. – Иваново: ПресСто, 2011. – С. 11–17.

4. Ч у к р е е в, Ю. Я. Проблемы сравнения отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности ЭЭС / Ю. Я. Чукреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 62: Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения / отв. ред. Н. И. Воропай, В. А. Савельев. – Иваново: ПресСто, 2011. – С. 95–103.

5. А л е к с а н д р о в, О. И. Оптимизация суточного режима энергосистемы / О. И. Александров, С. В. Домников, Г. Г. Бабкевич // Известия РАН. Энергетика и транспорт. – 1993. – № 1. – С. 81–97.

6. М а р к о в и ч, И. М. Режимы энергетических систем / И. М. Маркович. – М.: Энергия, 1969. – 351 с.

7. Н а д е ж н о с т ь систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы / Г. Ф. Ковалев [и др.]; под ред. Н. И. Воропая. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд. РАН, 1999. – 204 с.

8. С к о п и н ц е в, В. А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть / В. А. Скопинцев. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 331 с.

9. А л е к с а н д р о в, О. И. Расчет оптимальных графиков электропотребления промышленного узла нагрузки / О. И. Александров // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 3. – С. 16–20.

10. А л е к с а н д р о в, О. И. Математическая модель оптимизации электроснабжения дефицитных регионов по межсистемным линиям связи / О. И. Александров, М. Ш. Мисриханов, Н. В. Радоман // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 62: Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения / отв. ред. Н. И. Воропай, В. А. Савельев. – Иваново: ПресСто, 2011. – С. 468–476.

11. Ф у р с а н о в, М. И. Многоуровневые балансы электроэнергии в электрических сетях Белорусской энергосистемы / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике». – Минск: БНТУ, 2012.

Представлена кафедрой  
электротехники и электроники БНТУ

Поступила 31.01.2013

УДК 621.32

## **ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЖИМ РАБОТЫ СЕТИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ**

**Канд. техн. наук, доц. КОЗЛОВСКАЯ В. Б., инж. КАЛЕЧИЦ В. Н.**

*Белорусский национальный технический университет*

Расход электроэнергии на освещение составляет около 13–15 % общего электропотребления, при этом на долю наружного освещения приходится примерно 0,4 % общегородского. Можно выделить несколько особенностей сетей наружного освещения, оказывающих существенное влияние на режимы их работы. Линии наружного освещения являются достаточно

протяженными, содержащими 30 и более светильников, расположенных на расстоянии 35–50 м друг от друга. Единичная мощность лампы в сети составляет от 70 до 400 Вт. Управление светильниками наружного освещения осуществляется со шкафов, каждый из которых охватывает расстояние 1,0–1,5 км. Такие протяженные линии со значительными нагрузками являются очень чувствительными к колебаниям напряжения, поэтому грамотное построение их с точки зрения оптимального распределения нагрузок, протяженности и сечения проводников является актуальной задачей. Величина напряжения оказывает существенное влияние на показатели электропотребления и эксплуатационные характеристики различных ламп [1]. Эффективность и условия эксплуатации светильников наружного освещения определяются режимом работы сети.

Наиболее широко в наружном освещении применяются натриевые лампы высокого давления в светильниках, подключенных к одной из фаз через электромагнитный пускорегулирующий аппарат (ЭмПРА) с импульсным зажигающим устройством и (или без) индивидуальным компенсирующим конденсатором. Выбор групповой или индивидуальной компенсации для каждого светильника осуществляется технико-экономическим расчетом [2].

Существующие установки наружного освещения состоят из пунктов питания, имеющих канал связи с центральным диспетчерским пунктом, от которого поступают команды управления освещением (включение/отключение, смена режима и т. д.). Наружное освещение может включаться вручную из диспетчерского пункта или автоматически. В пунктах питания осуществляются коммутация, управление, контроль и учет; они могут располагаться в трансформаторных подстанциях (10/0,4 кВ) или непосредственно на световых опорах.

Расчет параметров электрической сети наружного освещения имеет характерные особенности. Характеристикой светильника как электроприемника являются потребляемая активная и реактивная мощности, ток нагрузки, которые зависят от напряжения на зажимах светильника. Если это не учитывать, то расчетные потери напряжения и расчетные напряжения на зажимах светильников, разноудаленных от пункта питания, будут иметь значения, отличающиеся от фактических.

В целях рассмотрения важности учета перечисленных особенностей произведем сравнение работы сети наружного освещения в различных условиях. Оценим влияние уровня напряжения в начале линии наружного освещения (пункт питания) на параметры такой сети: мощность, потребляемую электроэнергию, величину светового потока, срок службы ламп. Для решения поставленной задачи зададимся исходными данными электрической сети наружного уличного освещения: используем лампы типа ДНаТ (дуговая натриевая трубчатая) мощностью 250 Вт, подключенные через ЭмПРА с импульсным зажигающим устройством и компенсирующим конденсатором (коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,9$ ) в светильнике типа ЖКУ. Удаленность от источника питания до первой опоры равна 70 м, расстояние между опорами – 30 м (принимая, что приблизительно соответствует длине используемого кабеля), число опор – 30, число светильников на опоре – 1. Для питания светильников используется кабель АВВГ-5×10-0,66. Светильники подключены симметрично (к каждой фазе по 10 светильников), распределение светильников между фазами – А–В–С–А–В–С.

Эксплуатационные условия работы электрических сетей определяются исходными данными, в качестве которых для расчета режима задают напряжение в начале линии наружного освещения (в пункте питания), а также нагрузку непосредственно на светильнике.

Нагрузку на светильнике (лампа и пускорегулирующий аппарат) принимаем 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 [3].

Номинальные технические характеристики светильника: активная мощность лампы 250 Вт, активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА  $P_{\text{ном}} = 278$  Вт; номинальное напряжение  $U_{\text{ном}} = 220$  В; емкость компенсирующего конденсатора  $C = 35$  мкФ; полный рабочий ток лампы  $I_{\text{л.ном}} = 3,0$  А; полный ток с учетом компенсации  $I_{\text{ном}} = 1,35$  А. Для упрощения расчетов принимаем, что величины потерь активной мощности и полный ток с учетом компенсации реактивной мощности изменяются пропорционально зависимостям, представленным в [3].

Тогда зависимости активной мощности (с учетом потерь в ЭмПРА) и полного тока (с учетом компенсации) светильника с лампой типа ДНаТ с компенсированным ЭмПРА номинальной мощностью 278 Вт от напряжения сети имеют вид, представленный на рис. 1.

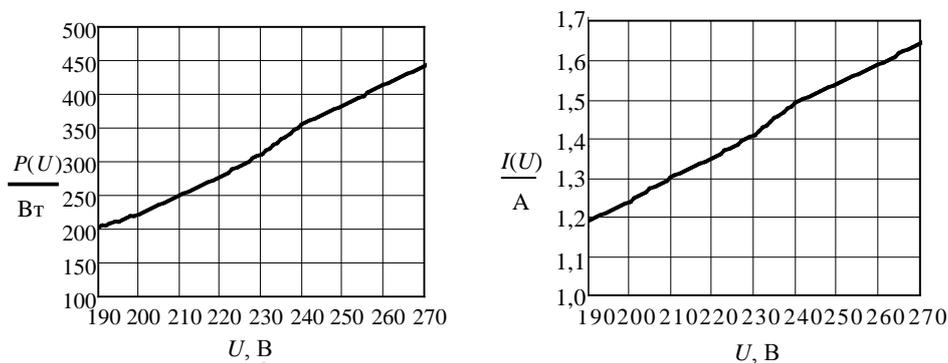


Рис. 1. Зависимости активной мощности (с учетом потерь в ЭмПРА)  $P(U)$  и полного тока (с учетом компенсации)  $I(U)$  светильника с лампой типа ДНаТ с компенсированным ЭмПРА номинальной мощностью 278 Вт от напряжения сети

Расчет режима такой сети наружного освещения осуществляем методом последовательных приближений [4]. 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). Для удобства написания программы 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.

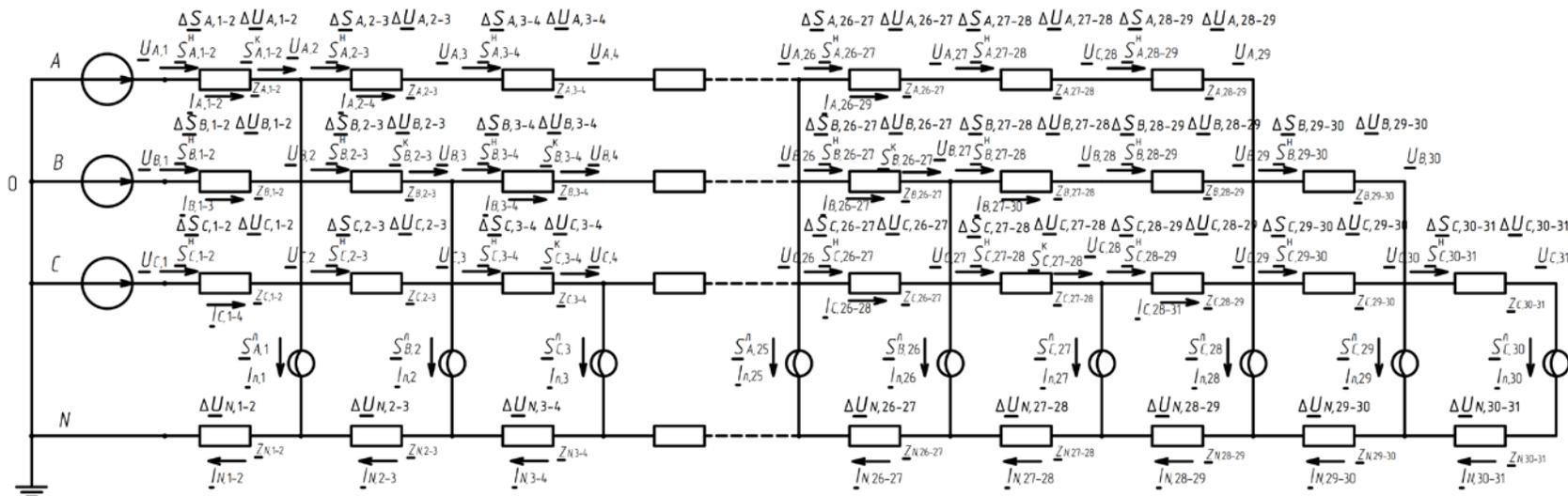


Рис. 2. Расчетная схема сети наружного освещения:  $\underline{U}_{A,1}$  – комплексное значение напряжения в 1-м узле фазы  $A$ ;  
 $\underline{S}_{A,1-2}^H$ ,  $\underline{S}_{A,1-2}^K$  – комплексные значения полной мощности в начале и конце участка 1–2 фазы  $A$  соответственно;  $\underline{S}_{A,1}^H$  – комплексное значение полной мощности светильника, подключенного к фазе  $A$ , имеющего первый порядковый номер;  $\Delta \underline{S}_{A,1-2}$  – комплексное значение потерь полной мощности на участке 1–2 фазы  $A$ ;  $\underline{Z}_{A,1-2}$ ,  $\underline{Z}_{N,1-2}$  – комплексные значения полных сопротивлений участка для фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;  
 $\Delta \underline{U}_{A,1-2}$ ,  $\Delta \underline{U}_{N,1-2}$  – падения напряжения на участке 1–2 фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;  $\underline{I}_{A,1-2}$ ,  $\underline{I}_{N,1-2}$  – комплексные значения полных токов на участке 1–2 фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;  $\underline{I}_{n,1}$  – комплексное значение полного тока светильника, имеющего первый порядковый номер (обозначения параметров фаз  $B$  и  $C$  аналогичны)

Расчет сети при значении напряжения в пункте питания (начале линии), равном 230 В, показан на примере фазы *A*. Нахождение параметров для фаз *B* и *C* аналогичны.

Определение параметров осуществляется итерационным путем в два этапа. Первоначально задаются значения неизвестных фазных напряжений на зажимах светильников и в остальных точках схемы (рис. 2), например равными фазному напряжению в начале линии (пункте питания):

$$\underline{U}_{A,2}^{(0)} = \underline{U}_{A,3}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{A,29}^{(0)} = \underline{U}_{A,1}^{(0)} = 230e^{j0} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{B,2}^{(0)} = \underline{U}_{B,3}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{B,30}^{(0)} = \underline{U}_{B,1}^{(0)} = 230e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{C,2}^{(0)} = \underline{U}_{C,3}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{C,31}^{(0)} = \underline{U}_{C,1}^{(0)} = 230e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Комплексное значение полной мощности светильника в первом приближении определяется как

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

где  $R(U_{A,n}^{(0)})$  и  $I(U_{A,n}^{(0)})$  – значения потребляемой активной мощности и полного тока, определяемые в соответствии с зависимостями рис. 1; индекс (1) – первое приближение; *A* – наименование фазы; *n* – номер узла.

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

$$\Delta \underline{S}_{A,(n-1)-n}^{(1)} = \left( \frac{S_{A,(n-1)-n}^{к(1)}}{U_{A,n}^{(0)}} \right)^2 (R_{A,(n-1)-n} + jX_{A,(n-1)-n}), \quad (2)$$

где  $R_{A,(n-1)-n}$ ,  $X_{A,(n-1)-n}$  – активное и реактивное сопротивления участка;  $S_{A,n-1}^{к(1)}$ ,  $U_{A,n}^{(0)}$  – полная мощность и напряжение в конце  $((n-1) - n)$  участка.

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

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

где  $S_{A,(n-1)-n}^{к(1)} = \underline{S}_{A,n}^{л(1)} + \underline{S}_{A,n-(n+1)}^{н(1)}$ .

Расчет потокораспределения аналогично выполняется поочередно для каждого участка. На этом первый этап алгоритма заканчивается.

Второй этап заключается в расчете уточненных значений фазных напряжений при известном напряжении в начале линии (пункте питания)

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

Падение напряжения на участке 1–2

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

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

Комплексные значения полных токов на участке 1–2 равны:

$$\underline{I}_{A,1-2}^{(1)} = \frac{\dot{S}_{A,1-2}^{n(1)}}{\underline{U}_{A,1}^{(0)}}; \quad (6)$$

$$\underline{I}_{N,1-2}^{(1)} = \sum_{i=2}^n \left[ \frac{\dot{S}_{A,i}^{n(1)}}{\underline{U}_{A,i}^{(0)}} + \frac{\dot{S}_{B,i}^{n(1)}}{\underline{U}_{B,i}^{(0)}} + \frac{\dot{S}_{C,i}^{n(1)}}{\underline{U}_{C,i}^{(0)}} \right], \quad (7)$$

где  $\dot{S}_{A,1-2}^{n(1)}$ ,  $\underline{U}_{A,1}^{(0)}$  – сопряженные комплексы мощности, фазного напряжения.

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:

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

Программа, позволяющая задавать исходные данные сети наружного освещения и рассчитывать параметры, реализована в среде MathCad.

Отклонение напряжения на выводах электроприемников является одним из показателей качества электрической энергии и регламентируется ГОСТ 13109–97 «Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения». В соответствии с указанным документом выделяются нормально и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах электроприемников, которые соответственно равны  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$  от номинального напряжения электрической сети. В связи с этим для рассмотренной осветительной сети произведены расчеты для трех характерных режимов, определяемых величиной напряжения в пункте питания: режима работы осветительной сети с модулем напряжения в пункте питания, равным номинальному  $U_1 = 230$  В, и двух режимов с предельно допустимыми значениями ( $\pm 10\%$ ) отклонения напряжения от номинального в пункте питания  $U_1 = 207; 253$  В.

Результаты сравнительных расчетов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Результаты сравнительных расчетов при различных уровнях напряжения в пункте питания**

Номер светильника	Модуль полного значения напряжения на выводах и комплексное значение полной мощности для светильников (в зависимости от напряжения в начале линии), присоединенных к																	
	фазеА						фазеВ						фазеС					
	$U_1 = 230 \text{ В}$		$U_1 = 207 \text{ В}$		$U_1 = 253 \text{ В}$		$U_1 = 230 \text{ В}$		$U_1 = 207 \text{ В}$		$U_1 = 253 \text{ В}$		$U_1 = 230 \text{ В}$		$U_1 = 207 \text{ В}$		$U_1 = 253 \text{ В}$	
	$U_A, \text{ В}$	$\underline{S}_A^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_A, \text{ В}$	$\underline{S}_A^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_A, \text{ В}$	$\underline{S}_A^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_B, \text{ В}$	$\underline{S}_B^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_B, \text{ В}$	$\underline{S}_B^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_B, \text{ В}$	$\underline{S}_B^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_C, \text{ В}$	$\underline{S}_C^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_C, \text{ В}$	$\underline{S}_C^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$	$U_C, \text{ В}$	$\underline{S}_C^{\text{п}}, \text{ В}\cdot\text{А}$
1	227,2	301,6 + +j95,6	204,5	234,2 + +j110,0	249,7	383,3 + +j28,1	226,0	297,8 + +j97,1	203,5	231,7 + +j110,1	248,4	379,2 + +j30,1	224,9	294,1 + +j98,5	202,4	228,8 + +j110,2	247,2	375,9 + +j31,8
2	224,1	291,6 + +j99,5	201,8	227,1 + +j110,3	246,2	373,0 + +j33,3	222,8	287,2 + +j101,1	200,6	223,8 + +j110,5	244,7	368,5 + +j35,7	221,7	283,5 + +j102,5	199,5	221,1 + +j110,0	243,6	365,4 + +j37,4
3	221,5	282,8 + +j102,7	199,5	221,0 + +j109,9	243,1	364,0 + +j38,2	219,9	277,8 + +j104,5	198,1	218,5 + +j108,3	241,4	359,1 + +j40,8	218,8	274,7 + +j105,1	197,0	216,3 + +j107,0	240,4	356,0 + +j42,5
4	219,2	275,7 + +j104,9	197,4	217,1 + +j107,5	240,4	356,2 + +j42,4	217,4	270,9 + +j105,8	195,9	214,3 + +j105,8	238,6	348,7 + +j53,2	216,4	267,8 + +j106,3	194,8	212,0 + +j104,5	237,6	344,3 + +j59,2
5	217,2	270,3 + +j105,9	195,7	213,9 + +j105,6	238,2	346,9 + +j55,7	215,3	264,9 + +j106,9	194,0	210,7 + +j103,7	236,1	337,9 + +j66,9	214,2	261,8 + +j107,4	192,8	208,4 + +j102,4	235,2	333,8 + +j71,4
6	215,7	265,5 + +j106,7	194,3	211,3 + +j104,1	236,3	338,9 + +j65,8	213,5	259,9 + +j107,8	192,5	207,7 + +j102,1	234,1	328,9 + +j76,3	212,4	256,8 + +j108,4	191,2	205,3 + +j100,8	233,2	325,1 + +j80,0
7	214,5	262,5 + +j107,3	193,3	209,2 + +j102,9	234,9	332,7 + +j72,6	212,1	255,9 + +j108,5	191,2	205,3 + +j100,8	232,4	321,7 + +j83,0	211,0	252,8 + +j109,1	189,9	202,8 + +j99,5	231,6	318,0 + +j86,2
8	213,6	260,1 + +j107,7	192,5	207,8 + +j102,1	233,9	328,3 + +j76,9	211,0	252,9 + +j109,1	190,2	203,5 + +j99,9	231,2	316,2 + +j87,7	209,9	249,6 + +j109,7	188,9	200,9 + +j98,5	230,4	312,6 + +j90,6
9	213,1	258,7 + +j108,0	192,1	207,0 + +j101,7	233,4	325,9 + +j79,2	210,3	250,8 + +j109,5	189,6	202,2 + +j99,1	230,3	312,5 + +j90,7	209,1	247,5 + +j109,7	188,1	199,6 + +j97,8	229,5	309,4 + +j92,6
10	213,0	258,3 + +j108,1	192,0	206,7 + +j101,5	233,3	325,5 + +j79,6	209,9	249,6 + +j109,7	189,2	201,5 + +j98,8	229,9	310,7 + +j92,0	208,6	246,1 + +j109,7	187,8	198,8 + +j97,4	229,0	307,6 + +j93,3

Таблица 2

**Результаты сравнительных расчетов величин суммарных мощностей в начале линии наружного освещения при различных уровнях напряжения в пункте питания**

Режим работы сети в зависимости от напряжения в пункте питания	Комплексные значения полных мощностей для каждой из фаз в пункте питания, В·А			Комплексное значение полной мощности для схемы с напряжением в пункте питания $\underline{S}_{\Sigma}$ , В·А
	$\underline{S}_{A,1}$	$\underline{S}_{B,1}$	$\underline{S}_{C,1}$	
$U_1 = 230$ В	$2909 + j1051$	$2861 + j1064$	$2842 + j1071$	$8612 + j3186$
$U_1 = 207$ В	$2307 + j1059$	$2280 + j1043$	$2266 + j1032$	$6853 + j3134$
$U_1 = 253$ В	$3693 + j576$	$3614 + j662$	$3596 + j691$	$10903 + j1929$

### ВЫВОДЫ

Установлено, что уровень напряжения значительно влияет на активную и реактивную мощности, количество потребляемой электроэнергии светильниками с лампами типа ДНаТ. Также заметно изменяется световой поток лампы. Необходимо учитывать, что длительная работа при отклонениях сетевого напряжения более чем на 5 % от номинального значения приводит к сокращению срока службы лампы ДНаТ [5].

Представлена программа, позволяющая осуществлять выбор величины напряжения в пункте питания для работы осветительной сети в оптимальном режиме. Исходя из параметров режима могут проводиться мероприятия по улучшению условий работы источников света. Для этих целей рассматривается возможность использования стабилизатора (регулятора) напряжения, расположенного в пункте питания и работающего в режиме поддержания напряжения на заданном необходимом уровне. Это связано с тем, что режим работы с превышением уровня напряжения на лампе более чем на 5 % от номинального значения вызывает не только снижение срока службы источника света, но и больший расход активной электроэнергии. Зная режим работы осветительной сети (величину напряжения в начале сети, время включения и отключения освещения в зависимости от местности и времени года), можно определить возможную экономию электроэнергии. Кроме того, программа позволяет находить оптимальное число светильников заданной мощности, подключаемых к сети с установленными параметрами (сечение кабеля, удаленность опор).

### ЛИТЕРАТУРА

1. К о з л о в с к а я, В. Б. Электрическое освещение: учеб. / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. – Минск: Техноперспектива, 2011. – 543 с.
2. П р а в и л а устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Госэнергонадзор, 2000.
3. С п р а в о ч н а я книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
4. Г е р а с и м е н к о, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 2-е изд. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 715 с.
5. Р о х л и н, Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Рохлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 31.01.2013