

УДК 621.3.026.5

Ф. П. Говоров¹, В.Н. Терешин², О.В. Король¹, В.Ф. Говоров¹¹Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова²Межрегиональная академия управления персоналом

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАЗРЯДНЫМИ ЛАМПАМИ

Рассмотрены особенности компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов, которые учитывают низкий уровень корреляции графиков напряжения и реактивной мощности, делающий невозможным применение традиционных методов и технических средств компенсации реактивной мощности, основанных на применении статических конденсаторов, а также высокий уровень высших гармоник в сетях, вызванный наличием большого числа электроприемников с нелинейными характеристиками (разрядных и светодиодных источников света, вентиляльных преобразователей, электромагнитных устройств и т.д.) при значительном уровне их несимметрии. Для учета всех составляющих реактивной мощности, результирующая реактивная мощность в электрических сетях представлена в виде геометрической суммы реактивных мощностей сдвига, искажения и несимметрии. Для оценки влияния составляющих реактивной мощности впервые дана их количественная оценка и геометрическая интерпретация. Для решения задачи компенсации реактивной мощности в рассматриваемых условиях разработана совокупность методов и технических средств, обеспечивающих реализацию рассмотренных основных положений.

Ключевые слова: реактивная мощность, осветительные сети, кривые тока, кривые напряжения, несимметрия, разрядная лампа, мощность искажения.

Введение

Современное состояние энергетики Украины характеризуется значительным уровнем затрат энергетических ресурсов на выработку 1 кВт·ч электроэнергии, с одной стороны, и большим ее расходом на единицу продукции и значительными потерями в сетях, с другой. В рассмотренных условиях, важное значение, имеют условия работы осветительных электрических сетей, через которые пропускается около 20 % вырабатываемой электроэнергии.

Известно [1], что основным потребителем осветительных электрических сетей являются разрядные источники света. Исследования, проведенные авторами [1,2] свидетельствуют о том, что эффективность использованной электроэнергии в них находится на довольно низком уровне. Это связано со значительным расходом электроэнергии на технологические нужды и потерями мощности в сетях. Если первая из составляющих эффективности достаточно подробно исследована в известной литературе [3-5], то вопросы, связанные с потерями мощности в осветительных электрических сетях изучены еще в не достаточной мере. При этом, важным фактором, определяющим значение потерь мощности в сетях является значение реактивной мощности в них. Следует отметить, что применение электромагнитных ПРА в сочетании со значительной реактивностью самих разрядных ламп приводит к тому, что значение $\cos \varphi$ в осветительных электрических сетях

находится в большинстве случаев на уровне 0,6–0,8, вызывая значительной величины потери напряжения и мощности в сетях и, как следствие, значительный расход и потери электроэнергии в осветительных электроустановках.

Состояние вопроса.

Постановка задач исследования

Как показано в [6,12] разрядные лампы являются нелинейными элементами и потребляют значительное количество реактивной мощности. В общем виде, в сетях с такими элементами имеет место протекание реактивных мощностей сдвига и искажения [7,8]. Поскольку, каждая из составляющих реактивной мощности имеет особенности возникновения и характера протекания, соответственно и различными являются способы их компенсации. Поэтому, определенный интерес представляет исследование процессов в разрядных лампах с целью выявления распределения мощностей в лампах и разработки мероприятий по повышению эффективности работы осветительных электрических сетей на их основе.

Исследованию энергетических процессов в разрядных лампах посвящен ряд работ [9-11]. В [9] на уровне физических процессов в лампах дано описание особенностей возникновения и характера протекания реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами. В [10,11] обоснована необходимость одновременного

учета реактивной мощности сдвига и искажения в них. В то же время комплексного исследования процессов в разрядных лампах с учетом наличия реактивной мощности сдвига и искажения, причинно-следственных связей их возникновения и характера протекания не производилось, чем обуславливается наличие значительных потерь мощности и энергии в сетях, а также низкое качество электроэнергии в них. По этой причине исследование указанных причин представляет научный и практический интерес.

Исследования процессов в разрядных лампах

Исследования физических процессов в разрядных лампах, проведенные в [9], свидетельствуют о наличии в разрядных лампах нового типа реактивной мощности, которая связана с инерционностью носителей зарядов. Указанная составляющая реактивной мощности может связываться скорее всего с реактивной мощностью сдвига. В тоже время многочисленные расчеты численного значения реактивной мощности в сетях с разрядными лампами свидетельствуют о наличии дополнительной, неучтенной энергии. Последнее может быть объяснено наличием другого типа реактивной мощности – мощности искажения.

Для исследования процессов в цепях с разрядными лампами может быть использовано соотношение [12]:

$$S^2 = P^2 + Q_C^2 + T^2 + Q_{HC}^2, \quad (1)$$

где $P = \frac{1}{T} \int P dt = \frac{1}{T} \int u i dt$ – активная мощность

цепи; Q_C, T, Q_{HC} – мощности сдвига, искажения и несимметрии, соответственно.

В рассматриваемых условиях в случае единичного электроприемника $Q_{HC} = 0$ и задача исследования может быть сведена к выявлению в разрядных лампах величины, характера и соотношения между реактивной мощностями сдвига Q_{LC} и искажения T_L .

Значение реактивной мощности сдвига разрядных ламп Q_{LC} может быть определено в виде:

$$Q_{LC} = U_{LC} I_{LC} \sin \varphi_{LC}. \quad (2)$$

Значение реактивной мощности искажения T_L может быть определено в виде:

$$T_L = \sum_{\nu} Q_{L\nu} = \sum_{\nu} U_{L\nu} I_{L\nu} \sin(\varphi_{u\nu} - \varphi_{i\nu}). \quad (3)$$

Для оценки величины и соотношения мощностей Q_{LC} и T_L , значение мощности сдвига Q_{LC} определено по результатам измерения мощности разрядной лампы P_L , напряжения U_L и тока I_L на лампе, как

$$Q_C = \sqrt{S_L^2 - P_L^2} = \sqrt{U_L^2 I_L^2 - P_L^2}. \quad (4)$$

Значение реактивной мощности искажения T_L определено на основе разложения напряжения U_L и тока лампы I_L в гармонический ряд Фурье. С этой целью авторами проведены экспериментальные исследования на установке, схема которой приведена на рис. 1.

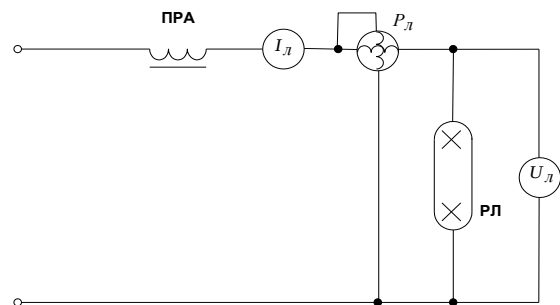


Рис.1 – Схема экспериментальной установки

Действующие значения мощности, напряжения и тока на лампе P_L, U_L, I_L , а также их гармонические составляющие $U_{L\nu}, I_{L\nu}$ определялись с помощью установки МАРС-Энерго построенной на основе системы SMART, которая сертифицирована и используется в службе измерений АК «Харьковобл-энерго». Измерение параметров электропотребления P_i, U_i, I_i осуществлялось с дискретностью 0,001 с. Исследованию подвергались лампы с электромагнитными и электронными ПРА типа ДНаТ-150, ДРЛ-400, ЛБ-36 и КЛЛ-20. Технические характеристики ламп приведены в табл.1.

Таблица 1- Технические характеристики разрядных ламп

№.	Тип РЛ	$P_{ном},$ Вт	$U_{нл},$ В	$I_{нл},$ А	$\eta,$ лм/Вт	$T_{сл},$ ч.
1	ДНаТ-150	150	110	1,33	113	24000
2	ДРЛ-400	400	110	3,25	55	16000
3	ЛБ-36	36	103	0,43	84	15000
4	КЛЛ-20	20	220	0,133	80	15000

На рис. 2 приведены кривые напряжения U_L и тока I_L на лампе ДНаТ-150 с электромагнитным ПРА, полученные экспериментально. Аналогичный характер имеют кривые и для других типов разрядных ламп.

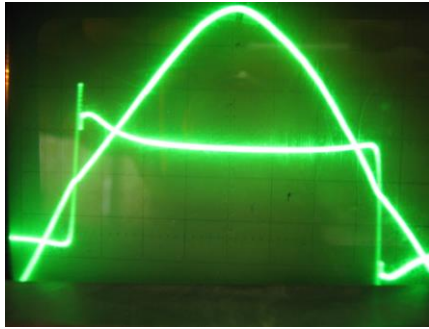


Рис.2 – Кривые напряжения и тока на лампе ДНаТ-150 с электромагнитным ПРА

Их математическое описание для пяти наиболее значимых гармоник имеет вид:

$$u_L(\omega t) = [20,8991 \cdot \sin(\omega t + 5.2^\circ) + 6.358 \cdot \sin(3\omega t + 58.621^\circ) + 7.4907 \cdot \sin(5\omega t + 3.56^\circ)] \cdot m_u$$

$$i_L(\omega t) = [55.311 \cdot \sin(\omega t - 11.02^\circ) + 5.8188 \cdot \sin(3\omega t - 18.6^\circ) + 2.0817 \cdot \sin(5\omega t - 3.85^\circ)] \cdot m_i$$

$$p_L(\omega t) = [577.98 \cdot \cos(5.2^\circ + 11.02^\circ) + 18.5 \cdot \cos(58.62^\circ + 18.6^\circ) + 7.8 \cdot \cos(3.56^\circ + 3.85^\circ)] \cdot m_p$$

$$q_L(\omega t) = [577.98 \cdot \sin(5.2^\circ + 11^\circ) + 18.5 \cdot \sin(58.62^\circ + 187.6^\circ) + 7.8 \cdot \sin(3.56^\circ + 3.85^\circ)] \cdot m_q$$

Полученным описаниям соответствуют кривые, приведенные на рис. 3, 4.

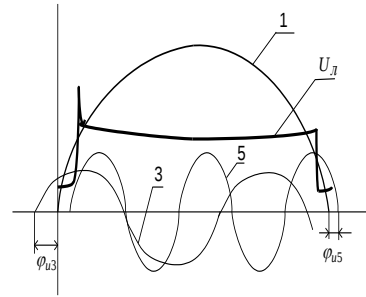
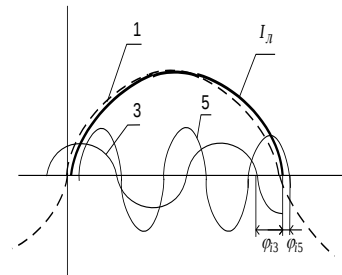
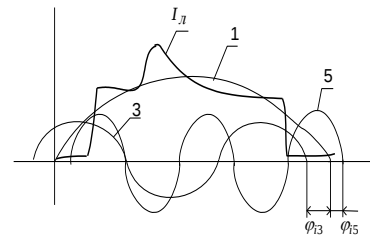


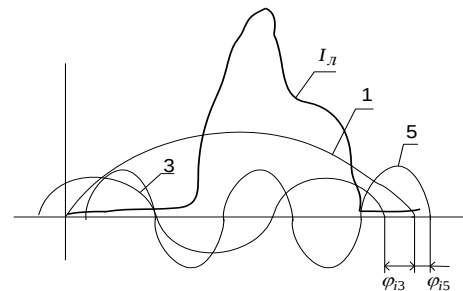
Рис. 3 Спектральный состав кривой $U_L(t)$ лампы с электромагнитным ПРА
1, 3, 5 – номера гармоник;
 φ_{u1-5} – фазовый сдвиг гармоник.



а)



б)



в)

Рис. 4 Спектральный состав кривой $I_L(t)$ для разрядной лампы с электромагнитным (а), электронным (б) ПРА и КЛЛ (в)

1, 3, 5 – номера гармоник;

φ_{i1-5} – фазовый сдвиг гармоник.

Более полно спектральный состав кривых напряжения U_{Li} и тока I_{Li} приведен в табл. 2-3.

Таблица 2 - Спектральный состав кривых напряжения U_L

Тип ламп	Номер гармоники, %					
	1	3	5	7	9	11
ДНаТ-150	98,64	35,14	32,26	18,32	8,12	5,06
ДРЛ-400	96,32	32,46	18,64	10,57	5,65	3,15
ЛБ 36	95,73	25,84	10,65	9,08	5,18	3,43
КЛЛ 21	95,916	24,31	9,36	8,94	5,21	2,58

Таблица 3 - Спектральный состав кривых тока I_L

Тип ламп	Номер гармоники, %					
	1	3	5	7	9	11
ДНаТ-150	98,6	29,6	24,3	12,6	4,4	1,2
	91,1	10,4	44,1	8,19	4,38	3,2
ДРЛ-400	99,14	18,1	14,3	12,8	4,01	2,96
ЛБ 36	99,2	11,3	4,6	4,4	2,38	1,3
КЛЛ 21	84,6	21,4	6,2	4,3	2,53	1,1

Результаты расчета параметров электропотребления приведены в табл.4.

Таблица 4 - Результаты расчета параметров электропотребления

Тип лампы	$\cos \phi_L = P_L / S_L$	P_L , Вт	U_L , В	I_L , А	T_L , вар	$Q_{сл}$, вар	$D_{сл} = \sqrt{Q_{сл}^2 + T_L^2}$, вар
ДНаТ-150	0,62	155	110	1,33	18,9	48,3	51,86
	0,61	156	110	1,34	62,1	15,6	64,03
ДРЛ-400	0,53	413	220	3,25	92,32	24,6	95,54
ЛБ 36	0,45	39,26	220	0,39	9,56	23,1	25,03
КЛЛ 21	0,946	21	220	0,133	22,2	7,2	23,34

Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что при решении вопросов компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами, наравне с реактивной мощностью сдвига Q_c , необходимо учитывать реактивную мощность искажения T , действие которой определяется наличием высших гармоник тока и напряжения в осветительных электрических сетях.

Пути повышение коэффициента мощности в осветительных электрических сетях

Как установлено в [2,9], низкое значение коэффициента мощности разрядной лампы обуславливает существенное снижение эффективности работы осветительных электрических сетей и систем электроснабжения в связи с пропусканием по сетям значительного количества реактивной мощности.

Анализ параметров и режимов осветительных электрических сетей, проведенный авторами, указал на наличие в них ряда особенностей определяющих условия компенсации реактивной мощности в них. Важнейшими из них являются слабая корреляция графиков нагрузки и реактивной мощности (рис.3), а также протекание в них мощности искажения. Наличие указанных особенностей ограничивает возможность применения традиционных методов комплексного решения вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в сетях с помощью батарей статических конденсаторов (БСК) и делает необходимым применение специальных методов, обеспечивающих решение задачи компенсации в условиях слабой корреляции графиков нагрузки и реактивной мощности, а также наличия искажений кривых тока и напряжения.

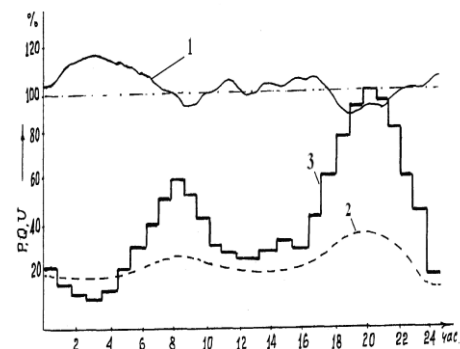
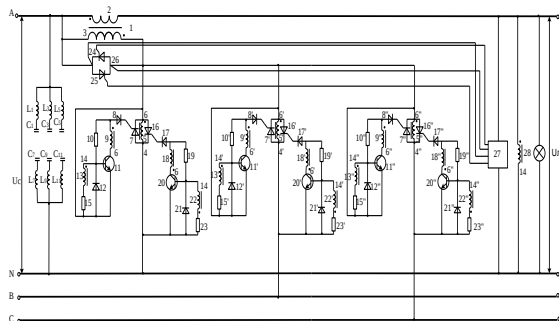


Рис.5 – Графики изменения напряжения (U), активной (P) и реактивной (Q) мощностей на шинах низшего напряжения ТП: 1 – $U(t)$; 2 – $Q(t)$; 3 – $P(t)$

Проведенные в ХНУГХ исследования, свидетельствуют о целесообразности применения в таких случаях фазопереключаемых вольтодобавочных трансформаторов (рис.4). Использование в них достоинств магнитной и полупроводниковой техники

в сочетании с подключением вторичных обмоток к различным фазам питающей сети позволяет достаточно простым и эффективным способом решать вопросы регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Более того, возможность создания большого числа комбинаций модуля и фазы добавочной ЭДС открывают возможность для развязанного управления режимами напряжения и реактивной мощности и, как следствие, – управление параметрами режима осветительных электрических сетей в условиях слабой корреляции графиков нагрузки и реактивной мощности.

Устройство на базе ВДТ содержит вольтодобавочный трансформатор 1, в котором вторичная обмотка 2 соединена с входным и выходным зажимами, а первичная обмотка 3 соединена согласно с первичной. Причем вывод первичной обмотки 3, являющийся ее концом, подключен к выводу вторичной обмотки 2, связанному с входным выводом. Свободные концы первичной обмотки 3 через тиристорные ключи на встречно-параллельно соединенных тиристорах 7-16 соединены с одной из фаз сети. К свободным концам первичных обмоток, связанных с тиристорными ключами на тиристорах 7-16, подключен тиристорный ключ на встречно-параллельно соединенных тиристорах 24 и 25. Управляющие электроды всех тиристоров соединены с блоком управления 27.



Экспериментальные исследования работы таких устройств в осветительных электрических сетях городов подтвердили справедливость основных теоретических выводов и возможность снижения потерь мощности в осветительных электрических сетях за счет комплексного развязанного управления режимами напряжений и составляющими реактивной мощности.

чительную экономию материальных и энергетических ресурсов.

Таблица 5 – Параметры режима
вольтдобавочного трансформатора

Группа соединений	Модуль исходящего напряжения	Фазовый сдвиг исходящего напряжения
XII	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} + 2 \right) + 1}$	$\varphi_H = 0$
I or XI	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} + 1,7 \right) + 1}$	$\varphi_H = \pm \arctg \frac{0,5}{K_T - 0,866}$
II or X	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} + 1 \right) + 1}$	$\varphi_H = \pm \arctg \frac{0,866}{K_T - 0,5}$
III or IX	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} + 1}$	$\varphi_H = \pm \arctg \frac{1}{K_T}$
IV or VIII	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} + 1,73 \right) + 1}$	$\varphi_H = \pm \arctg \frac{0,5}{K_T - 0,866}$
V or VII	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} - 1 \right) + 1}$	$\varphi_H = \pm \arctg \frac{0,866}{K_T + 0,5}$
VI	$U_H = U_1 \sqrt{\frac{1}{K_T} \left(\frac{1}{K_T} - 2 \right) + 1}$	$\varphi_H = 0$

На основе разработанных основных положений, на кафедре светотехники и источников света ХНУМГ разработан отрезок серии многофункциональных преобразователей напряжения для осветительных электрических сетей. Общий вид преобразователя приведен на рис.6. Их применение в системах освещения г.г. Измаил, Харьков, Сумы и др. подтвердило возможность комплексного решения задачи регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях и позволило получить за счет этого зна-

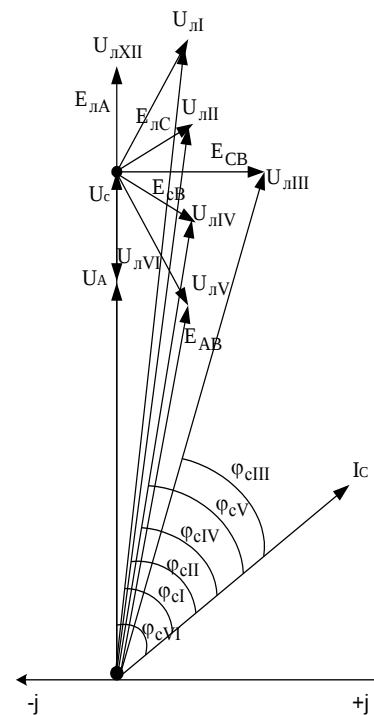


Рис.7 – Реализация функции компенсации реактивной мощности на основе фазопереключающего вольтодобавочного трансформатора



Рис.8 - Многофункциональный преобразователь напряжения

Выводы

1. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать о наличии в осветительных электрических сетях двух составляющих реактивной мощности – реактивной мощности сдвига Q_c и реактивной мощности искажения T .

2. Расчеты выполненные по результатам экспериментальных исследований свидетельствуют о соизмеримости значения реактивной мощности искажения Т со значением мощности сдвига Q_c , что требует применения специальных методов и технических средств компенсации.

3. Рассмотренные в работе технические средства компенсации реактивной мощности на базе вольтодобавочного трансформатора в состоянии обеспечить комплексное решение вопросов регулирования напряжения и раздельной компенсации реактивной мощности сдвига Q_c и искажения Т.

Литература

1. Говоров П.П. Украинская светотехническая отрасль – современное состояние и перспективы // *Світло Люкс*, 2007, №6, с.76-80.
2. Говоров П.П., Пилипчук Р.В., Токмань А.І., Щиренко В.В., Яремчук Р.Ю. Освітлення промислових об'єктів. – Тернопіль: Джурра, 2008. – 388 с.
3. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Нессиметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005.–250 с.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
5. Козлов В.А. Электроснабжение городов / В.А. Козлов – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 264 с.
6. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Четверикова И.М., Терешин В.Н., Денисенко В.И. К вопросу о реактивной мощности в осветительных установках с разрядными лампами // *Технічна електродинаміка.-К.: Інститут електродинаміки НАН України*. 2008. – Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки, Ч.5. – С.13-17.
7. Fryze S. Active, Reactive and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems, *Przegled Elektrotek. Polska* – 1931.- № 7.- P. 193-203.
8. Сегеда М.С. Электричні мережі та системи: Підручник.-Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
9. Говоров Ф.П. К вопросу о компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами / Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, В.А. Перепеченый, О.В. Терешин // *Світло Люкс* – 2009.– №6.– С. 60-64.
10. Солончак О.В., Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним (нелінійним) навантаженням / О.В. Солончак, І.В. Гладь // *Енергетика та електрифікація* – 2008.– № 6.– С.27-32.
11. Говоров П.П. Керування режимами розподільних електричних мереж міст на основі гнучких систем: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02. – Львів, 2001. – 386 с.
12. Рохлин Р.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.- 463 с.

Автор: ГОВОРОВ Филипп Парамонович

Харківський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков, доктор технических наук, профессор.

E-mail – govorov_fp@mail.ru

Автор: ТЕРЕШИН Виктор Николаевич

Региональная академия управления персоналом, Харьков, доктор технических наук, профессор.

Автор: КОРОЛЬ Ольга Викторовна

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков, научный сотрудник.

E-mail – oljana830804@mail.ru

Автор: ГОВОРОВ Владлен Филиппович

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков, научный сотрудник.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF SOCIAL-CULTURAL AND DOMESTIC OBJECTS ON THE BASIS OF SYSTEM MODERNIZATION THEIR HEAT SUPPLY, WATER SUPPLY AND LIGHTING

F.P. Govorov, V. N. Tereshin, O.V. Korol, V. F. Govorov

The features of the reactive power compensation in electricity supply systems of cities that take into account the low level of correlation graphs of voltage and reactive power as well as a high level of higher harmonics in the network caused by the presence of a large number of electrical receivers with nonlinear characteristics (discharge and LED light sources, valve converter, electromagnetic devices etc) combined with a significant level of nonsymmetry. To take into account all the components of reactive power, resulting reactive power in urban electrical networks is presented in the form of the geometric sum of the reactive power shift, distortion and nonsymmetry. To assess the effect of reactive power shift was first given its quantification and a geometric interpretation. To solve the problem of reactive power compensation under these conditions developed a set of methods and technical means ensuring the implementation of the main provisions.

Keywords: a reactive-power, lighting networks, the crooked currents, the crooked voltage, nonsymmetry, discharge lamps, resulting reactive power.