

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0.4 КВ

Н.П.Боярская, Я.А. Кунгс, С.А.Темербаев,
В.П.Довгун, А.Ф.Синяговский

В статье рассмотрены результаты анализа качества электроэнергии в сетях крупных офисных и коммерческих потребителей. Проведенные исследования показывают, что в городских распределительных сетях наблюдаются значительные искажения формы кривых токов, вызванные нелинейными нагрузками. Во многих случаях уровень искажений превышает пределы, определяемые международными стандартами. Рассмотрено негативное влияние высших гармоник на сети электроснабжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, высшие гармоники.

Введение

Одной из актуальных проблем современного электроснабжения является проблема обеспечения качества электроэнергии. Основной причиной ухудшения качества электроэнергии является широкое распространение нелинейных нагрузок, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы.

Для анализа несинусоидальных токов и напряжений применяют разложение в ряд Фурье, согласно которому периодическая функция представляется в виде суммы гармоник, частоты которых кратны основной частоте питающей сети. Высшие гармоники оказывают неблагоприятное влияние на работу силового электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики, вызывают ускоренное старение изоляции [1, 2].

Основным источником гармонических искажений являются нелинейные нагрузки крупных промышленных потребителей. Однако в последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в распределительных сетях крупных городских потребителей – торговых комплексов, офисных зданий, учебных заведений. В этом случае нелинейной нагрузкой является офисное оборудование (персональные компьютеры, серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания и т.п.), использующее однофазные источники питания, а также системы освещения на основе люминесцентных ламп или светодиодных светильников. У таких потребителей доля нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную

составляющую. Следует учитывать также неизбежную не симметрию распределения этих потребителей по фазам

В статье приведены результаты измерений показателей качества электроэнергии у крупных городских потребителей. Рассмотренные примеры, по мнению авторов, достаточно полно характеризуют особенности несинусоидальных режимов в городских распределительных сетях.

Измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения проводились при помощи анализатора качества электроэнергии PM175 SATEC. Прибор позволяет измерять прямые показатели качества электрической энергии по методике ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [3].

В соответствии с методикой ГОСТ13109-97 вычисление значений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производилось по формулам:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100,$$

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100.$$

Здесь $I_{(n)}$, $U_{(n)}$ – действующие значения n -й гармонической составляющей тока и напряжения; I_1, U_1 – действующие значения тока и напряжения основной частоты.

Измерения показателей качества электроэнергии у каждого потребителя проводились в течение 24 часов.

Анализ результатов измерений

В этом разделе приведены результаты измерений гармонического состава токов и напряжений крупных городских потребителей – учебно- административного корпуса университета и системы наружного освещения торгово-развлекательного комплекса. Для каждого потребителя приведены суточные графики зависимостей первой и доминирующих гармоник токов и напряжений. На графиках показаны абсолютные значения первой гармоники измеряемой величины, и относительные, в процентах по отношению к первой, значения высших гармоник. Относительные значения четных гармоник не превышают 1 %, поэтому они не приводятся. Из-за ограниченного объема статьи приведена информация только о токе в фазе А и междупазном напряжении U_{AB} .

Учебно-административный корпус университета.

Корпус расположен в здании, построенном в конце XIX века. Основную нагрузку составляют освещение, персональные компьютеры и офисное оборудование. Занятия проводятся в одну смену, поэтому максимум потребления электроэнергии приходится на середину дня, с 9 до 14 часов.

Зависимость гармоник тока фазы А от времени показана на рисунке 1. Преобладающими являются 3 и 5 гармоники, их значение достигает 25% от величины тока основной гармоники. Ночью относительное содержание высших гармоник в спектре тока выше, т.к. основной нагрузкой в это время является дежурное освещение. Днем доля потребителей с линейными характеристиками выше, поэтому коэффициент искажения синусоидальной кривой тока уменьшается.

Спектральный состав напряжения показан на рисунке 2. Преобладающими являются 5 и 7 гармоники.

Таблица 1 – Учебно-административный корпус. Нечетные гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

n	Токи			Напряжения		
	Мин	Среднее	Макс	Мин	Среднее	Макс
3	0,08	9,67	16,96	0,14	0,25	0,68
5	7,85	15,87	24,30	1,26	2,25	3,85
7	0,37	5,11	11,85	0,34	1,14	2,48
9	0,32	2,78	7,43	0,09	0,20	0,40
11	1,17	10,31	26,31	0,16	0,91	1,87
13	0,41	3,89	12,98	0,10	0,36	1,01
15	0,24	2,01	5,41	0,07	0,12	0,26

Доля нагрузки с нелинейными характеристиками весьма велика, об этом свидетельствует большое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (рисунок. 3).

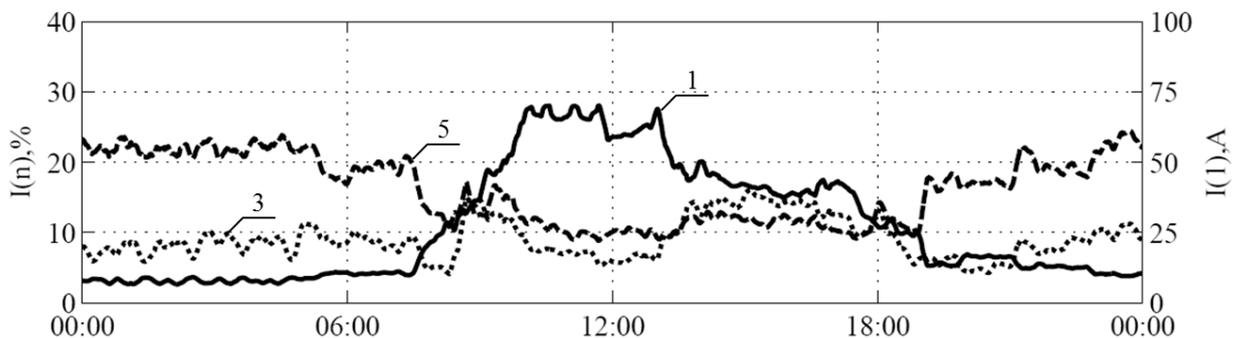


Рисунок 1 – Учебно-административный корпус. Гармоники тока в фазе А

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 КВ

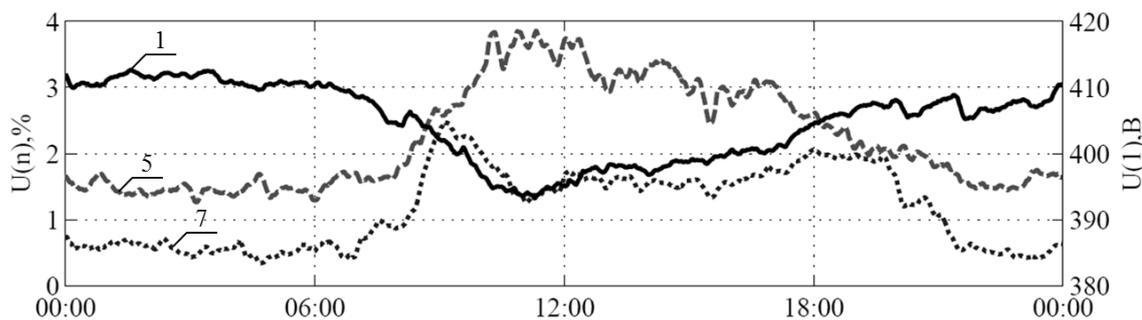


Рисунок 2 – Учебно-административный корпус. Гармоники напряжения

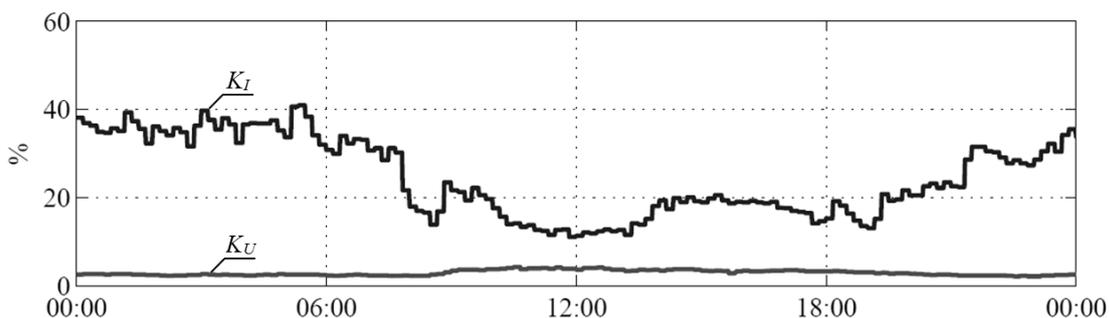


Рисунок 3 – Учебно-административный корпус. Коэффициенты искажения кривых тока и напряжения

Система наружного освещения торгово-развлекательного комплекса.

В качестве второго примера рассмотрим результаты измерений гармонического состава токов в сети наружного и декоративного освещения торгово-развлекательного комплекса. Освещение включается в 20:00 полностью, частично отключается в 01:00 и полностью выключается в 8:00.

На рисунке 4 приведены графики доминирующих гармоник тока фазы А.

На рисунке 5 показано как изменялась величина тока в нейтральном проводе. Необходимо отметить, что ток в нулевом проводе значительно превышает фазные токи. Это вызвано несимметрией нагрузки, а также большим уровнем токов третьей гармоники, суммирующихся в нейтральном проводе.

График изменения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока фазы А представлен на рисунке 6.

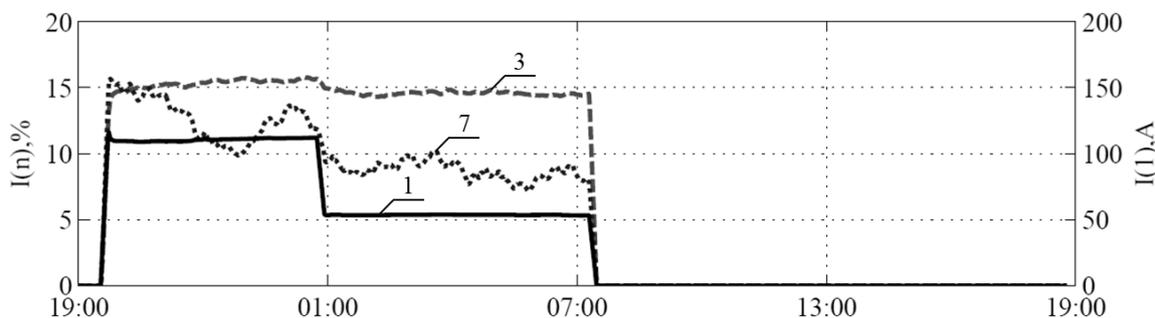


Рисунок 4 – Система наружного освещения. Гармоники тока в фазе А

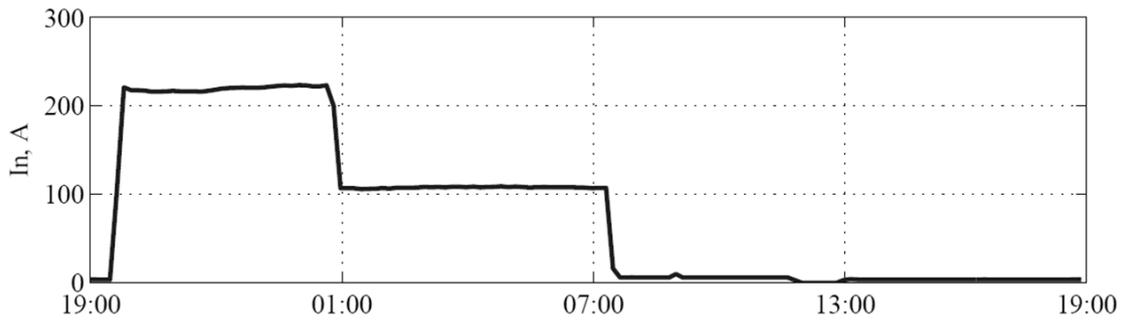


Рисунок 5 – Система наружного освещения. Ток в нулевом проводе

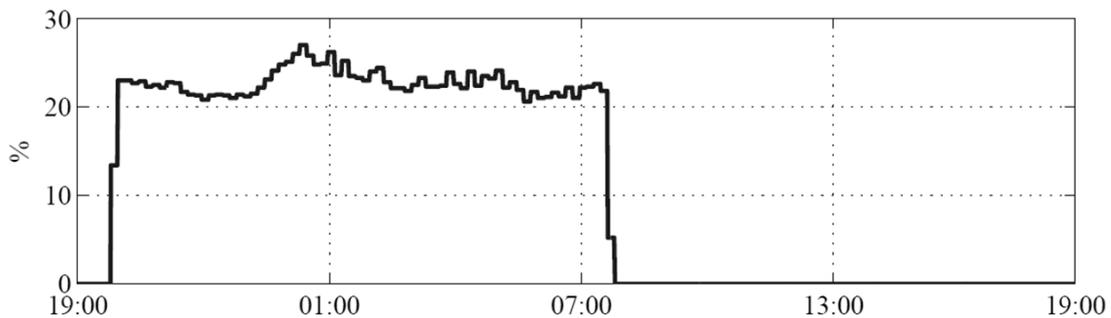


Рисунок 6 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока в сети наружного освещения

Заключение

Результаты проведенного анализа показывают, что проблема обеспечения качества электроэнергии весьма актуальна для распределительных сетей крупных городов. Наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. В ряде случаев коэффициент искажения синусоидальности кривой тока превышает 30%. Отметим, что измерения проводились на кабельных вводах. Во внутренних сетях зданий искажения токов и напряжений значительно выше. Согласно расчетам, проведенным в работе [4], значения K_T могут превышать 100%. В этом случае потери электроэнергии во внутренних сетях зданий увеличиваются в 2 – 2.5 раза по сравнению с синусоидальным режимом.

Нелинейные нагрузки городских потребителей существенно отличаются от промышленных нагрузок. Основные отличия заключаются в следующем.

Нагрузки коммерческих и офисных потребителей имеют распределенный характер. Поэтому эффективность подавления высших гармоник в значительной степени зависит от рационального выбора места установки компенсирующих устройств.

Серьезную проблему представляют токи третьей гармоники, суммирующиеся в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь и в ряде случаев – к авариям, вызванным перегоранием нейтрального провода. Кроме того, большие уровни токов третьей гармоники вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов и могут вызвать повреждение их изоляции.

Российский ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» устанавливает допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Однако допустимые значения синусоидальности кривой тока ГОСТ 13109-97 не нормирует.

Для того чтобы оценить, насколько велик уровень искажения токов, обратимся к международным стандартам. В электротехнической практике часто используются европейский стандарт EN 50160 и стандарт IEEE 519-1992. Эти стандарты определяют максимальные значения токов нечетных гармоник в процентах от тока нагрузки. В соответствии со стандартом IEEE 519-1992 [1] максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока зависит от отно-

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 КВ

шения тока короткого замыкания сети (I_{SC}) в точке общего присоединения к току нагрузки (I_L). В случае мощной сети ($100 < I_{SC}/I_L < 1000$) максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока не должно превышать 15%. Токи гармоник с порядковыми номерами $n < 11$ должны быть меньше 12% от тока нагрузки I_L . Результаты проведенных измерений показывают, что в большинстве случаев коэффициент искажения синусоидальности кривой тока значительно превышает допустимые значения, определяемые международными стандартами.

Электрические сети офисных зданий, построенных в 60 – 90 годы прошлого века, рассчитаны на относительно небольшие нагрузки. Широкое использование современного офисного оборудования может привести к их перегрузке. Замена кабелей в таких зданиях может потребовать значительных капитальных затрат. Следует учитывать и режим использования современного офисного оборудования. Как правило, персональные компьютеры включены в течение всего рабочего дня, а часть устройств (например, серверы) работает круглосуточно.

Очевидно, что широкое использование энергосберегающих устройств, имеющих нелинейные характеристики, может привести к увеличению гармонических искажений токов и напряжений. Поэтому мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности должны предусматривать меры, направленные на поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Наибольший эффект дает использование специальных компенсирующих устройств – активных и пассивных фильтров гармоник.

Традиционным средством подавления высших гармоник в сетях электроснабжения являются пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Пассивные фильтры производятся по традиционным хорошо отработанным технологиям. Их основными достоинствами являются простота и экономичность. ПФГ осуществляют не только фильтрацию высших гармоник, но и компенсацию реактивной мощности основной гармоники.

Недостаток пассивных фильтров заключается в том, что они являются статическими устройствами. Эффективность

ПФГ снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также при изменении режима работы сети. Другой недостаток – возможность возникновения резонанса токов в параллельном колебательном контуре, образуемого фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник.

Альтернативой пассивным устройствам являются активные фильтры гармоник (АФГ). АФГ представляет коммутируемое устройство, которое может выполнять одновременно несколько функций: подавление высших гармоник, коррекцию коэффициента мощности, снижение фликкера. В качестве коммутируемых элементов в активных фильтрах используются мощные МОП-транзисторы или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Следует отметить, что силовые активные фильтры гармоник не имеют ничего общего с активными RC-фильтрами, используемыми в системах телекоммуникации для обработки сигналов.

Важное достоинство активных фильтров заключается в том, что они представляют собой адаптивные устройства, характеристики которых изменяются в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Однако широкое применение АФГ ограничивается их сложностью и высокой стоимостью.

Наиболее перспективным направлением, обеспечивающим перестройку характеристик при относительно небольшой стоимости, является разработка гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, представляющих комбинацию пассивного и активного фильтров. Гибридные фильтры значительно дешевле активных и в то же время обладают достоинствами последних. Активный фильтр в составе гибридного ФКУ часто рассматривают как средство регулирования характеристик пассивного фильтра.

Исследования, проведенные в работах [5 – 7], показывают, что для компенсации несинусоидальных режимов в распределительных сетях 0,4 кВ необходимо создание интеллектуальных устройств, обеспечивающих управление основными параметрами, определяющими эффективность и качество электроснабжения – коэффициентом мощности, уровнем гармонических искажений, дозой фликкера и т.д. Решение перечисленных задач будет способствовать повышению качества и надежности электроснабжения в городских электрических сетях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / Куско А., Томпсон М.: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
2. И.В. Жежеленко, Высшие гармоники в сетях электроснабжения промышленных предприятий, 3-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Lai J.-S., Key T. Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings. IEEE trans. on Industry Applications, 1997, Vol.33, No.4, pp. 1104-1110.
5. Watson N., Scott T., Hirsch J. Implication for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1521-15281.
6. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers.

IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 1, 2005, pp. 384 – 389.

7. Боярская Н.П., Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса. Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 138 с.

Боярская Наталья Петровна,
преподаватель

Кунгс Ян Александрович, *к.т.н., профессор,*
Красноярский государственный аграрный университет,
E-mail: bnp2006dvg@mail.ru

Темербаев Сергей Андреевич *аспирант*
Довгун Валерий Петрович, *д.т.н., профессор,*
E-mail: vdovgun@sfu-kras.ru

Синяговский Артем Феликсович, *к.т.н., доцент,*
Сибирский федеральный университет