

УДК 621.311:658.562.6

Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ

**С.А. Темербаев^а, Н.П. Боярская^б,
В.П. Довгун^{а*}, В.О. Колмаков^а**

^а *Сибирский федеральный университет*

Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

^б *Красноярский государственный аграрный университет*

Россия 660049, Красноярск, пр. Мира, 90

Received 11.02.2013, received in revised form 18.02.2013, accepted 25.02.2013

В статье рассмотрены результаты анализа качества электроэнергии в сетях крупных офисных и коммерческих потребителей. Проведенные исследования показали, что в данных сетях наблюдаются значительные искажения формы кривых токов, вызванные ростом нелинейных нагрузок. 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 наиболее актуальных проблем современного электроснабжения является проблема обеспечения качества электроэнергии. Основная причина ухудшения качества электроэнергии – широкое распространение нелинейных нагрузок, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы. Их можно представить 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 сетях коммерческих и офисных потребителей – торговых комплексов, офисных зданий, учебных заведений. Нелинейной нагрузкой таких потребителей выступает офисное оборудование (персональные компьютеры, серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания и т.п.), использующее однофазные источники питания, а также регулируемые электроприводы систем кондиционирования и вентиляции. Освещение выполняется с помощью люминесцентных ламп с электронным балластом. У этой группы потребителей доля

нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную составляющую. Как правило, источники питания офисного оборудования используют мостовые выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами. В выпрямителях, используемых в современных источниках электропитания, напряжение сети подается непосредственно на диодный мост. Выпрямленный ток преобразуется с помощью коммутатора в переменный ток высокой частоты, а затем снова выпрямляется. Такие источники питания вызывают значительные искажения формы потребляемого тока, существенную долю которого составляют компоненты с частотой третьей гармоники.

Ухудшение качества электроэнергии в городских распределительных сетях характерно для большинства развитых стран. Так, в обзорной статье [2] отмечается, что уровень высших гармоник напряжения в электрических сетях японских городов превышает пределы, установленные стандартом. В обзоре [3] высшие гармоники названы основной причиной ухудшения качества электроэнергии в электрических сетях Тайваня. Анализ гармонического состава токов в распределительных сетях города Белем (Бразилия), приведенный в статье [4], показывает, что уровень третьей и пятой гармоник в некоторых случаях превышает 20 %. Авторы статьи отмечают, что наиболее высокий уровень высших гармоник характерен для распределительных сетей богатых кварталов, где используется большое количество бытовых электронных устройств.

Очевидно, что подобные проблемы характерны и для электрических сетей России. Это подтверждают и результаты анализа качества электроэнергии на предприятиях агропромышленного комплекса и в жилом секторе, проведенные авторами [5].

В настоящей статье приведены результаты измерений показателей качества электроэнергии ряда крупных офисных и коммерческих потребителей Красноярских городских электрических сетей.

Методика проведения измерений

Измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения проводились при помощи анализатора качества электроэнергии PM175 SATEC. Внешний вид прибора показан на рис. 1.

Прибор позволяет измерять прямые показатели качества электрической энергии по методике ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В процессе работы PM175 заполняется специальный журнал, в котором фиксируются все события, связанные с превышением какого-либо показателя его предельно допустимого значения по ГОСТ 13109-97.

В комплекте с прибором PM175 поставляется программное обеспечение для его настройки, мониторинга показателей качества электроэнергии и параметров сети в режиме реального времени, сбора данных и формирования отчетов. Вычисление значений коэффициентов гармоник осуществляется в соответствии с ГОСТ 13109-97:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100, K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100.$$



Рис. 1. Анализатор качества электроэнергии PM175 SATEC

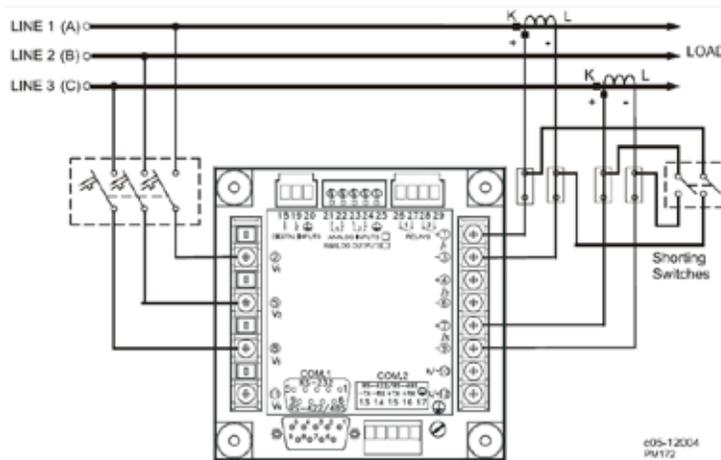


Рис. 2. Схема включения прибора

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.

Для измерений была использована схема трехпроводного прямого соединения с двумя трансформаторами тока (рис. 2).

Прибор был настроен на запись значений гармонических составляющих (с 1 до 16) токов и напряжений по каждой фазе с интервалом времени три секунды. Осуществлялись измерения и запись коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения с интервалом времени 1 минута. В соответствии с методикой ГОСТ 13109-97 вычисление значений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производилось по формулам

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100, \quad K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100.$$

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

Анализ результатов измерений

В статье приведены результаты измерений гармонического состава токов и напряжений ряда крупных городских потребителей – супермаркета, офисного центра, учебных заведений. 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. Следует отметить, что во всех случаях нагрузка была достаточно симметричной, поэтому с целью экономии места приведена информация о токе в фазе А и междуфазном напряжении U_{AB} .

Супермаркет. Основной нагрузкой этого вида потребителей являются холодильные установки, освещение и кассовое оборудование. График работы предприятия с 7.00 до 01.00. В ночное время включено только аварийное освещение.

Зависимости 1, 3 и 11 гармоник тока в фазе А от времени суток показаны на рис. 3.

Результаты измерений показали наличие высокого уровня 3 и 11 гармоник тока в сети (рис. 3). В ночное время основной нагрузкой являются холодильные установки, поэтому уровень высших гармоник в спектре тока уменьшается.

Зависимости 1 и 11 гармоник напряжения от времени суток показаны на рис. 4. Уровень гармоник напряжения не превышает допустимых значений, определяемых ГОСТ 13109-97.

Процентный состав гармонических составляющих в спектрах тока и напряжения приведен в табл. 1.

График изменения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока представлен на рис. 5. Как видно из рис. 5, в рабочее время значение коэффициента искажения синусоидальности достигает 25 %.

Максимальные, минимальные и средние значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения представлены в табл. 2.

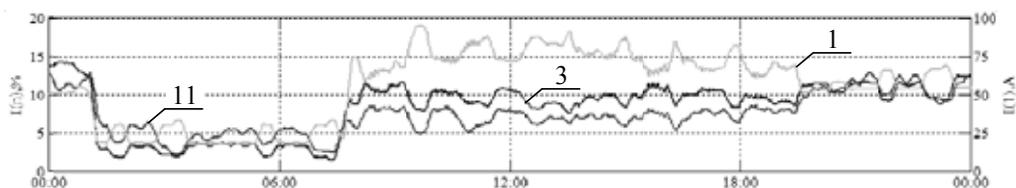


Рис. 3. Супермаркет. Гармоники тока в фазе А

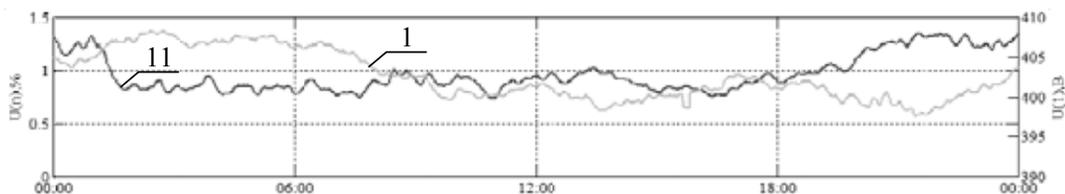


Рис. 4. Супермаркет. Гармоники напряжения

Таблица 1. Супермаркет. Нечетные гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А.

Номер	Токи			Напряжения		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
3	1,44	8,23	14,29	0,14	0,24	0,43
5	0,86	1,90	3,29	0,15	0,59	1,02
7	1,82	5,80	10,14	0,66	1,02	1,37
9	0,62	3,33	6,28	0,08	0,14	0,28
11	2,22	7,37	12,97	0,74	0,96	1,40
13	1,09	3,74	10,01	0,14	0,15	0,16
15	0,45	1,88	4,49	0,12	0,13	0,14

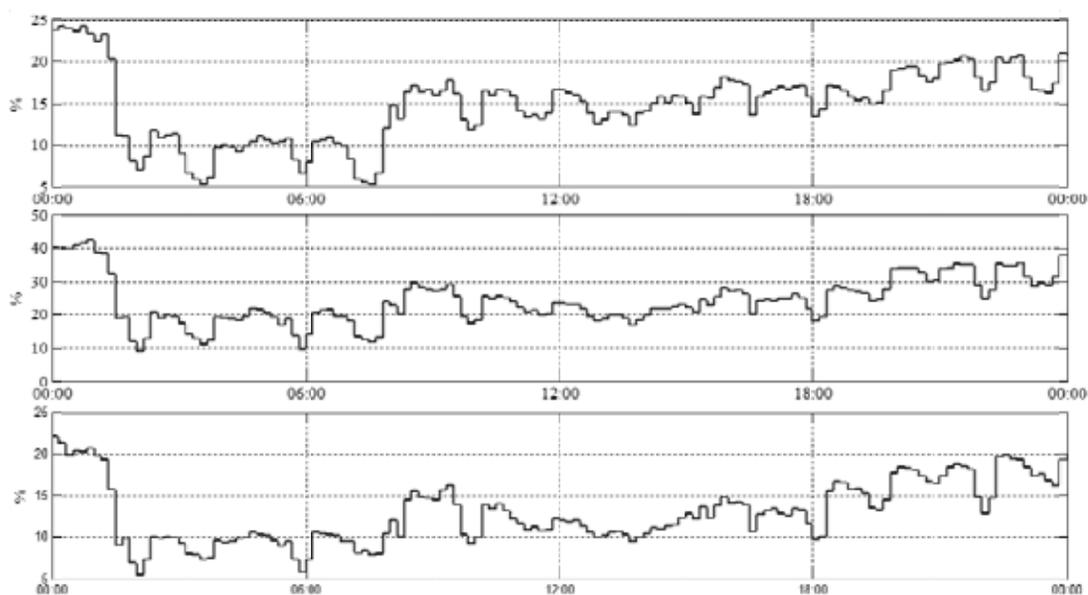


Рис. 5. Супермаркет. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока

Таблица 2. Супермаркет. Максимальные, минимальные и средние значения коэффициентов искажения синусоидальности тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{min}}$, %	1,4	1,4	1,3
K_U , %	1,8	1,7	1,7
$K_{U_{max}}$, %	2,2	2,1	2,2
$K_{I_{min}}$, %	4,2	7,6	5,4
K_I , %	14,7	24,1	13,2
$K_{I_{max}}$, %	25,0	43,2	22,4

Офисный центр. Офисный центр расположен в современном здании, построенном несколько лет назад. Питание потребителей осуществляется от двух трансформаторов мощностью 1000 кВА. Основные потребители электроэнергии – офисное оборудование, системы освещения и вентиляции. Максимум нагрузки приходится на период с 8.00 до 18.00.

На рис. 6 показаны зависимости гармонических составляющих тока в фазе А. Доминирующими являются 1, 3 и 11 гармоники.

На рис. 7 показаны зависимости гармоник напряжения. В спектре напряжения преобладают 11 и 13 гармоники. Однако их величина не превышает значения, определяемого ГОСТ 13109-97.

В табл. 3 приведены относительные значения гармонических составляющих тока и напряжения. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения приведены в табл. 4 и на рис. 8.

Уровень гармонических искажений токов достигает наибольших значений в рабочее время. Это говорит о том, что основной нелинейной нагрузкой является офисное оборудование и освещение. Следует отметить, что коэффициент искажения синусоидальности кривой тока в офисном центре меньше, чем у других потребителей. Отчасти это можно объяснить тем, что измерения проводились в июне, когда осветительная нагрузка минимальна.

Учебно-административный корпус университета. Он 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 9.00 до 14.00 часов.

Зависимость гармоник тока в фазе А показана на рис. 9. Преобладающими являются 3 и 5 гармоники тока, их значение достигает 25 % тока основной гармоники. В ночное время относительное содержание высших гармоник в спектре тока выше, т.к. основной нагрузкой является дежурное освещение. В дневное время доля потребителей с линейными характеристиками увеличивается, поэтому коэффициент искажения синусоидальности кривой тока уменьшается.

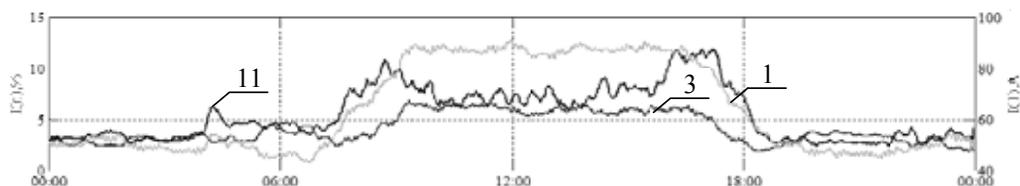


Рис. 6. Офисный центр. Гармоники тока в фазе А

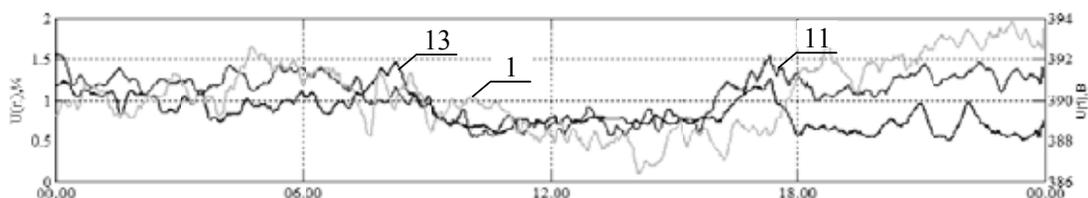


Рис. 7. Офисный центр. Гармоники напряжения

Таблица 3. Офисный центр. Гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

Номер	Токи			Напряжения		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
3	0,87	4,09	9,75	0,12	0,31	0,62
5	0,27	3,97	14,91	0,12	0,48	1,67
7	0,48	3,93	9,02	0,14	1,01	1,77
9	0,15	3,23	6,27	0,00	0,26	0,88
11	1,71	5,54	15,98	0,11	1,08	1,92
13	0,17	2,43	8,88	0,22	0,84	1,69
15	0,12	1,13	3,76	0,00	0,14	0,44

Таблица 4. Офисный центр. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{Umin}, \%$	1.7	1.5	1.5
$K_U, \%$	1.99	1.86	1.82
$K_{Umax}, \%$	2.4	2.3	2.2
$K_{Imin}, \%$	7.4	14.4	11.5
$K_I, \%$	10.73	18.25	13.87
$K_{Imax}, \%$	16.0	22.3	18.1

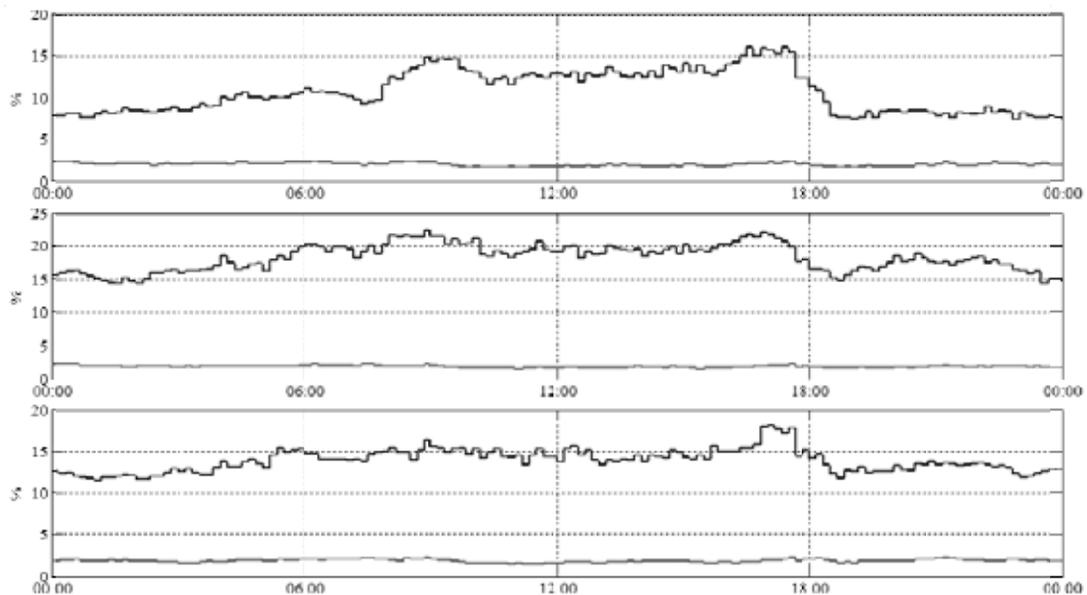


Рис. 8. Офисный центр. Коэффициенты искажения синусоидальности: — кривой напряжения (%); — кривой тока (%)

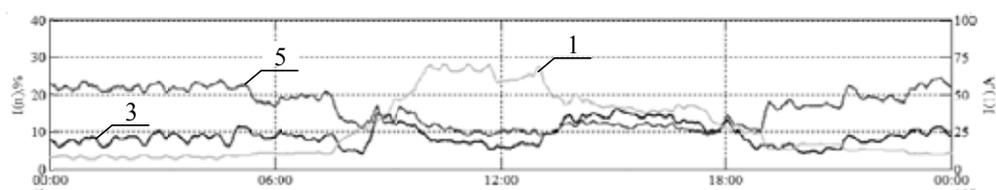


Рис. 9. Учебно-административный корпус. Гармоники тока в фазе А

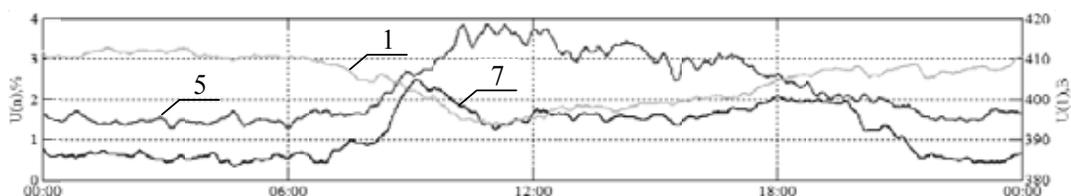


Рис. 10. Учебно-административный корпус. Гармоники напряжения

Таблица 5. Учебно-административный корпус. Нечетные гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

Номер	Токи			Напряжения		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
3	4,08	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

Спектральный состав напряжения показан на рис. 10. Преобладающими являются 5 и 7 гармоники.

Доля нагрузки с нелинейными характеристиками весьма велика, об этом свидетельствует большое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (рис. 11).

Средние, максимальные и минимальные значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения приведены в табл. 6.

Учебно-лабораторный корпус университета. Учебно-лабораторный корпус расположен в новом здании, сданном в эксплуатацию после 2000 года. Питание потребителей осуществляется от двух трансформаторов мощностью 400 кВА. Основными потребителями являются компьютеры, офисное оборудование и осветительная нагрузка. Общее число персональных компьютеров, установленных в компьютерных классах и аудиториях учебно-лабораторного корпуса, более двухсот. Учебные занятия проводятся с 8.30 до 22.00. Крупной нагрузкой служит система электропитания и охлаждения суперкомпьютера, работающая непрерывно.

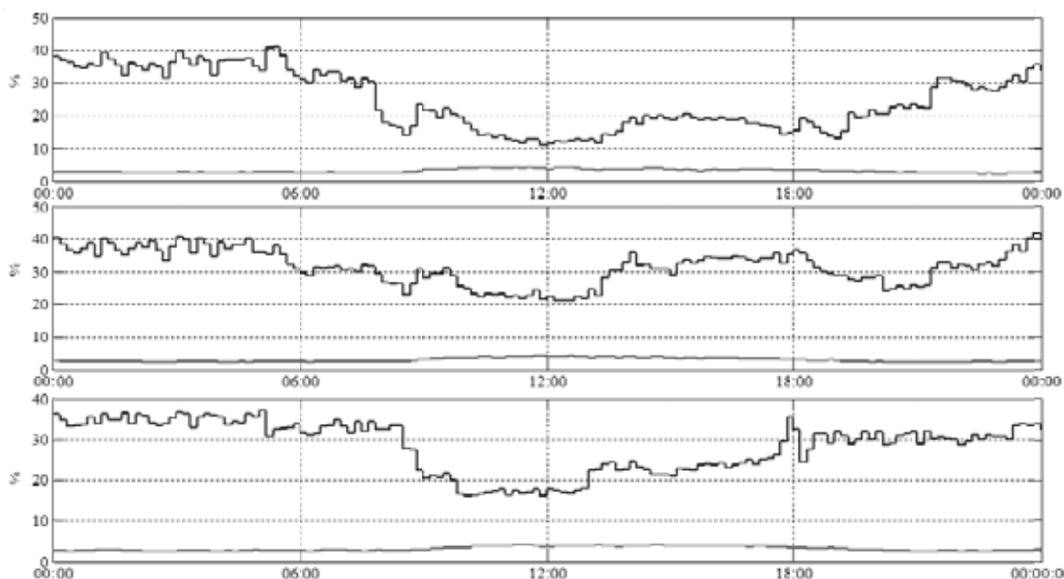


Рис. 11. Учебно-административный корпус. Коэффициенты искажения синусоидальности: — кривой напряжения (%); — кривой тока (%)

Таблица 6. Учебно-административный корпус. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{\min}}$, %	2.20	2.10	2.40
K_U , %	2.97	2.89	3.05
$K_{U_{\max}}$, %	4.30	4.20	4.20
$K_{I_{\min}}$, %	11.10	20.80	13.60
K_I , %	24.14	31.95	28.03
$K_{I_{\max}}$, %	40.90	42.70	37.00

Измерения проводились для двух основных вводов. Графики изменения доминирующих гармоник тока в течение суток показаны на рис. 12 и 13. Характер нагрузки на первом и втором вводах различается, поэтому различен и спектральный состав токов. Следует отметить, что относительное содержание третьей гармоники тока наибольшее в дневное время при максимальном потреблении электроэнергии. Причина в том, что значительную долю нелинейной нагрузки этого потребителя составляют источники питания персональных компьютеров.

Зависимость гармоник напряжения от времени суток показана на рис. 14, 15.

Гармонический состав токов и напряжений приведен в табл. 7, 8. На рис. 16, 17 представлены графики изменения коэффициента искажения синусоидальности кривых тока и напряжения в течение суток, а в табл. 9, 10 средние, минимальные и максимальные значения.

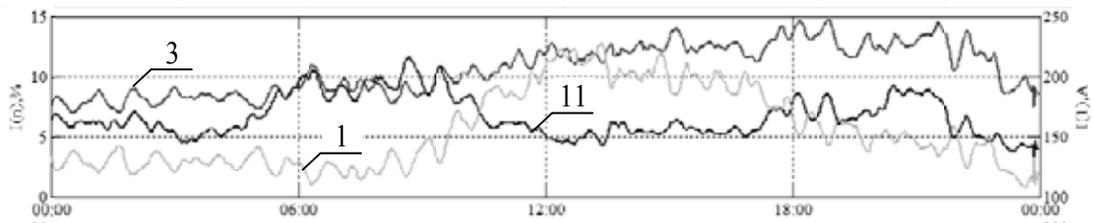


Рис. 12. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 1. Гармоники тока

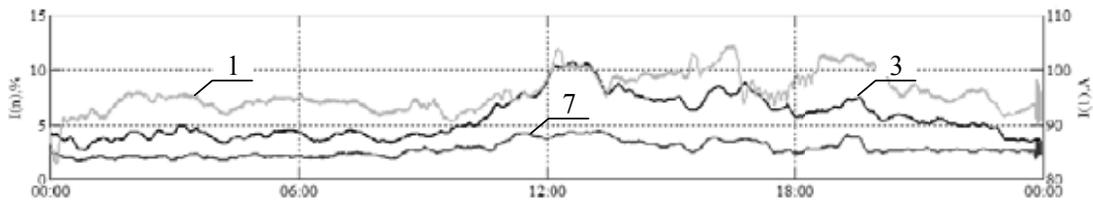


Рис. 13. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 2. Гармоники тока

Таблица 7. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 1. Нечетные гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

Номер	Токи			Напряжения		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
3	5,51	10,61	15,79	0,10	0,26	0,83
5	2,65	6,21	10,53	0,81	1,59	2,43
7	0,20	3,68	8,20	0,14	0,82	1,42
9	0,13	1,16	3,92	0,00	0,24	0,70
11	2,89	6,68	12,96	0,38	0,98	1,74
13	0,12	2,02	7,87	0,00	0,37	1,03
15	0,00	0,50	2,70	0,00	0,14	0,40

Таблица 8. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 2. Нечетные гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

Номер	Токи			Напряжения		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
3	2,00	5,56	11,43	0,10	0,24	0,66
5	0,18	3,05	7,38	0,10	0,47	1,14
7	0,53	2,72	5,00	0,12	1,00	1,73
9	0,30	1,72	3,73	0,00	0,37	1,35
11	0,29	1,56	2,98	0,67	1,33	2,42
13	0,51	1,40	2,84	0,10	0,46	0,96
15	0,42	1,00	1,93	0,00	0,12	0,37

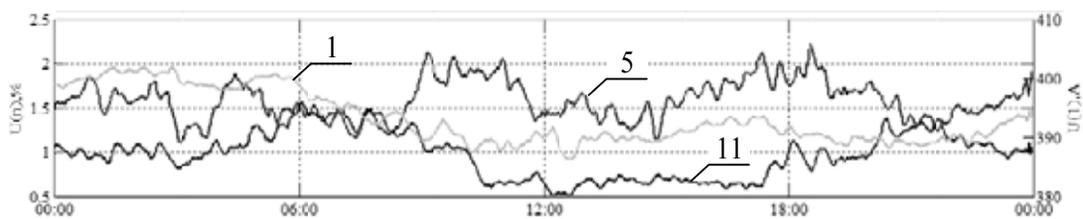


Рис. 14. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 1. Гармоники напряжения

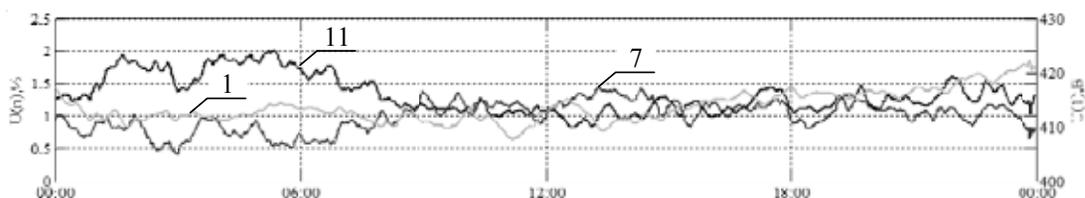


Рис. 15. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 2. Гармоники напряжения

Таблица 9. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 1. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{\min}}, \%$	1.70	1.70	1.70
$K_U, \%$	2.23	2.28	2.29
$K_{U_{\max}}, \%$	2.70	2.60	2.70
$K_{I_{\min}}, \%$	11.30	17.20	11.80
$K_I, \%$	15.05	22.96	15.35
$K_{I_{\max}}, \%$	20.00	29.60	18,40

Таблица 10. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 2. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{\min}}, \%$	1.60	1.40	1.40
$K_U, \%$	1.99	1.81	1.79
$K_{U_{\max}}, \%$	2.50	2.20	2.30
$K_{I_{\min}}, \%$	5.70	8.40	6.40
$K_I, \%$	7.96	14.72	10.05
$K_{I_{\max}}, \%$	13.10	24.90	15.00

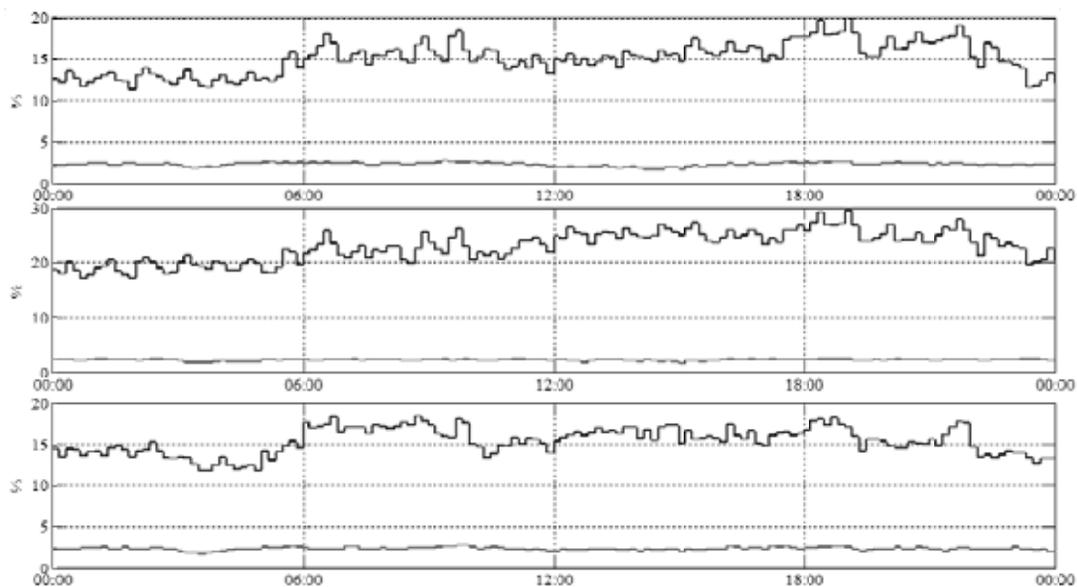


Рис. 16. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 1. Коэффициенты искажения синусоидальности: — кривой напряжения (%); — кривой тока (%)

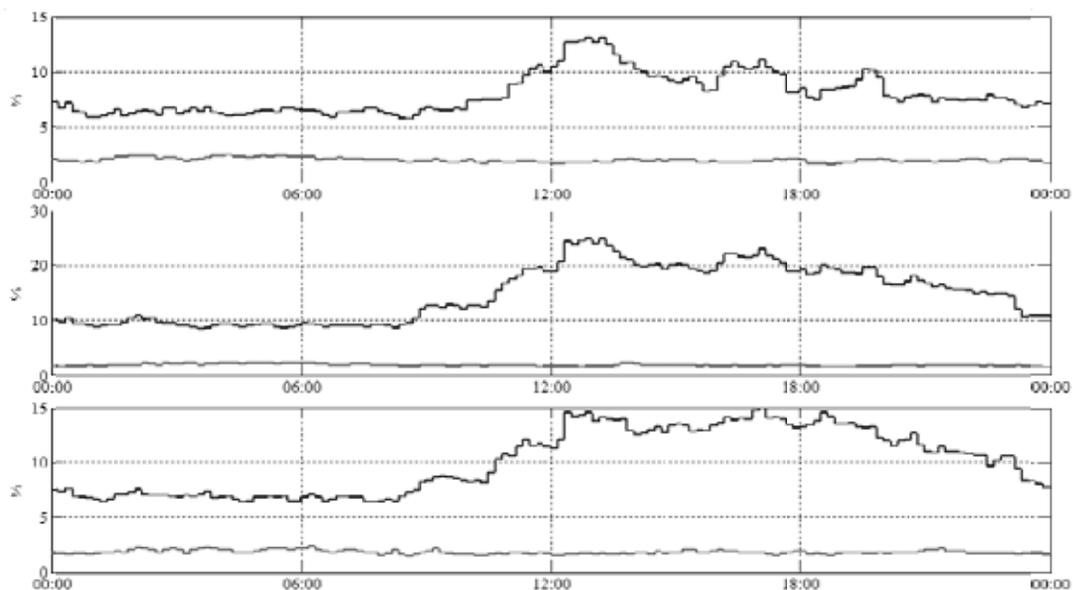


Рис. 17. Учебно-лабораторный корпус, ввод № 2. Коэффициенты искажения синусоидальности: — кривой напряжения (%); — кривой тока (%)

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что проблема обеспечения качества электроэнергии весьма актуальна для распределительных сетей крупных городов. Это подтверждают и исследования других авторов [4, 8, 9]. В сетях крупных коммерческих и офисных

потребителей 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. Коэффициент искажения синусоидальной формы кривой токов может превышать 100 % [7, 8]. В этом случае потери электроэнергии во внутренних сетях зданий увеличиваются в 2–2,5 раза по сравнению с синусоидальным режимом.

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 используют 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 отношения тока короткого замыкания сети в точке общего присоединения к току нагрузки. В случае мощной сети ($100 < L_{sc} / I_L < 1000$) 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 превышает допустимые значения, определяемые международными стандартами.

Электрические сети офисных зданий, построенных в 60–90 годы, 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 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 приводить 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.

Опыт показывает, что наибольший эффект дает использование специальных компенсирующих устройств – активных и пассивных фильтров гармоник. Необходимо создание активно-адаптивных устройств, обеспечивающих управление основными параметрами, определяющими эффективность и качество электроснабжения – коэффициента мощности, уровня

гармонических искажений, дозы фликера 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 / пер. с англ. М.: Додэка-XXI, 2008. 336 с.
- [2] *Akagi H.* // Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12. P. 2128–2141.
- [3] *Hu C-H., Wu C-J., Chen Y-W.* // IEEE trans. on Power delivery. 1997. Vol. 12. No. 3. P. 1275–1281.
- [4] *De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R.* // IEEE transactions on power delivery. 2005. Vol. 20. No. 1. Pp. 384–389.
- [5] *Боярская Н. П., Довгун В. П., Темербаев С. А., Шахматов С. Н.* // Вестник КрасГАУ, 2012. № 3. С. 169–182.
- [6] ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- [7] *Koval D., Carter C.* // IEEE trans. on industry applications, 1997. Vol. 33. No. 3. P. 613–621.
- [8] *Lai J.-S., Key T.* // IEEE trans. on Industry Applications, 1997. Vol.33. No. 4. P. 1104–1110.
- [9] *Watson N., Scott T., Hirsch J.* // IEEE transactions on power delivery, 2009. Vol. 24. No. 3. P. 1521–1528.

Analysis of Power Quality in Distribution Grids 0,4 kV

**Sergey A. Temerbaev^a, Natalia P. Boyarskaya^b,
Valery P. Dovgun^a and Vitaly O. Kolmakov^a**

^a *Siberian Federal University*

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^b *The Krasnoyarsk State Agrarian University*

90 Mira, Krasnoyarsk, 660049 Russia

This paper presents the results of power quality measurements in distribution systems of commercial and office customers. The data collected show serious currents distortions, caused by the increase count of nonlinear loads. In many cases the levels of distortion are higher than defined limits in international power quality standards. The negative impact of harmonic distortions is discussed.

Keywords: power quality, nonlinear load, high-order harmonics.
