

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

УДК 628.931

Н.П. Боярская, В.П. Довгун,
С.А. Темербаев, С.Н. Шахматов

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ АПК

В статье приведены результаты анализа гармонического состава токов и напряжений в сетях предприятий АПК центральных районов Красноярского края. Измерения показывают, что показатели качества электроэнергии обследованных потребителей в основном соответствуют требованиям ГОСТ 13109-97.

Установлено что, увеличение доли нелинейных нагрузок, вызванное использованием энергосберегающих технологий, приведет к увеличению уровня высших гармоник в спектрах токов и напряжений.

Ключевые слова: электроэнергия, качество, нелинейная нагрузка, гармонические искажения, распределительные сети, агропромышленный сектор.

N.P. Boyarskaya, V.P. Dovgun,
S.A. Temerbaev, S.N. Shakhmatov

ELECTRIC POWER QUALITY ANALYSIS IN THE AIC DISTRIBUTION NETWORKS

The analysis results of current and voltage harmonic composition in the AIC enterprise networks in the Krasnoyarsk region central parts are given in the article. The changes show that electric power quality indicators of the researched power users mostly meet the ГОСТ 13109-97 standards.

It is determined that nonlinear load share increase which is caused by energy-saving technology use will cause the higher harmonic level increase in the spectrum of current and voltage.

Key words: electric power, quality, nonlinear load, harmonious distortions, distributive networks, agroindustrial sector.

Введение. Характерной особенностью современных систем электроснабжения является увеличение числа потребителей с нелинейными вольт-амперными характеристиками, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы. Эти токи можно представить в виде суммы гармоник с частотами, кратными основной частоте питающей сети.

Высокий уровень содержания гармоник отрицательно влияет на эффективность работы промышленного электрооборудования, вычислительной техники, бытовых приборов, приводит к увеличению потерь электроэнергии, вызывает ускоренное старение изоляции. В связи с этим вопросам компенсации высших гармоник в электрических сетях уделяется все большее внимание.

Проблеме компенсации высших гармоник посвящено значительное количество публикаций отечественных и зарубежных авторов [1–4]. Однако в большинстве работ рассматривается влияние на качество электроэнергии крупных промышленных потребителей. Основным видом нелинейных нагрузок у таких потребителей являются многопульсные выпрямители с индуктивными сглаживающими фильтрами.

Несинусоидальные режимы в сетях, снабжающих электроэнергией предприятия АПК, подробно не изучались. Особенности сельских электрических сетей – большая протяженность ЛЭП, малые мощности короткого замыкания питающей сети. Ухудшению качества электроэнергии способствует появление многочисленных распределенных нелинейных нагрузок небольшой мощности, вызванное развитием энергосберегающих технологий, использованием возобновляемых источников энергии, быстрым распространением компьютерной и офисной техники.

В статье приведены результаты измерений качества электроэнергии, выполненные на предприятиях АПК, расположенных в центральных районах Красноярского края. Проведен анализ качества электроэнергии на соответствие требованиям ГОСТ 13109-97 [6].

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 рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид прибора

Прибор позволяет измерять прямые показатели качества электрической энергии по методике ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В процессе работы PM175 ведется специальный журнал, в котором фиксируются все события, связанные с превышением каким-либо показателем его предельно допустимого значения по ГОСТ 13109-97.

Электрическая схема подключения аналогична схеме подключения обычного трехфазного счетчика. Прибор подключался по схеме четырехпроводного соединения звездой с использованием трех трансформаторов тока (рис. 2).

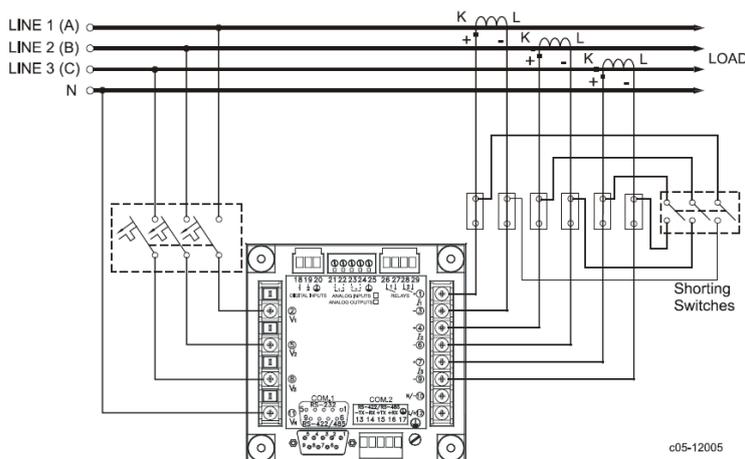


Рис. 2. Схема подключения

В комплекте с прибором PM175 поставляется программа PAS для настройки прибора, мониторинга показателей качества электроэнергии и параметров сети в режиме реального времени, сбора данных и формирования отчетов. Вычисление значений коэффициентов гармоник осуществляется по формулам, приведенным в ГОСТ13109-97:

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

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

где $I_{(n)}$, $U_{(n)}$ – действующие значения n -й гармонической составляющей тока и напряжения;

I_1, U_1 – действующие значения тока и напряжения основной частоты.

Прибор был настроен на запись значений коэффициентов n -й гармонической составляющей (с 1 до 16) тока и напряжения по каждой фазе с интервалом времени 3 с. Кроме коэффициентов отдельных гармоник прибор осуществлял измерение и запись коэффициента искажения синусоидальности кривых тока и напряжения с интервалом времени 1 мин. В соответствии с методикой ГОСТ13109-97 вычисление коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производится по формулам:

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

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

Как правило, измерения качества электроэнергии у потребителей проводились в течение 24 ч.

Результаты измерений. Приведем результаты измерений, проведенных на предприятиях АПК.

Цех по переработке молока. Цех подключен к отдельной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ. Мощность трансформатора 630 кВА. Установленная мощность электроприемников составляет 430 кВт. Самой крупной нагрузкой является парогенератор мощностью 200 кВт. Мощность осветительной нагрузки невелика.

Цех работает в одну смену. В ночное время основной нагрузкой являются приводы холодильников и кондиционеров, а также дежурное освещение. Загрузка цеха имеет сезонный характер. Замеры были проведены в июле, когда загрузка цеха максимальная.

На рисунках 3–5 приведены графики относительных значений (в процентах к 1-й гармонике) токов третьей, пятой и седьмой гармоник совместно с током нагрузки. Так как нагрузки по фазам симметричны, то приводятся данные только для фазы А.

Для гармонического состава напряжений доминирующими являются 5-я и 11-я гармоники вне зависимости от времени. Вероятно, наличие 15-й гармоники в спектрах напряжения и тока обусловлено влиянием мощных нелинейных нагрузок крупных промышленных предприятий.

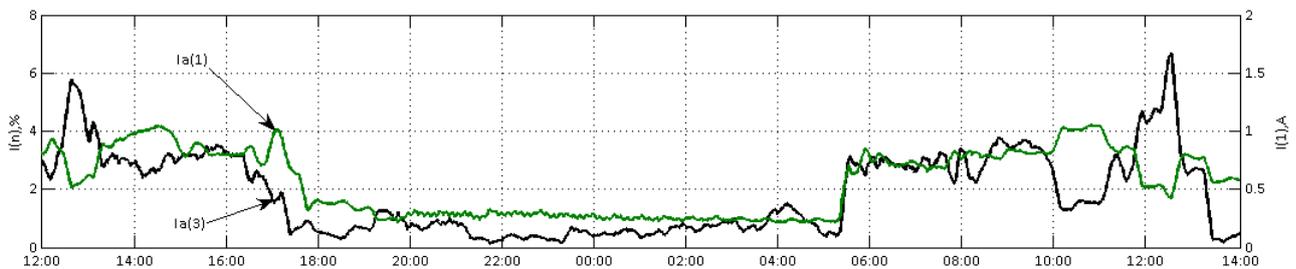


Рис. 3. Цех по переработке молока: 1-я и 3-я гармоники тока фазы А

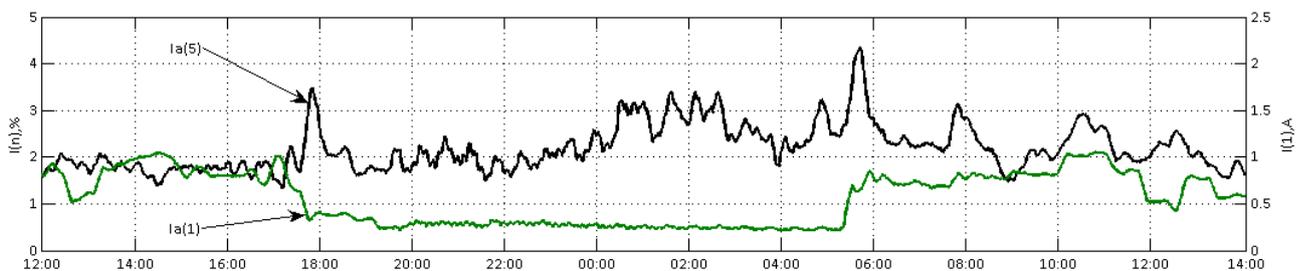


Рис. 4. Цех по переработке молока: 1-я и 5-я гармоники тока фазы А

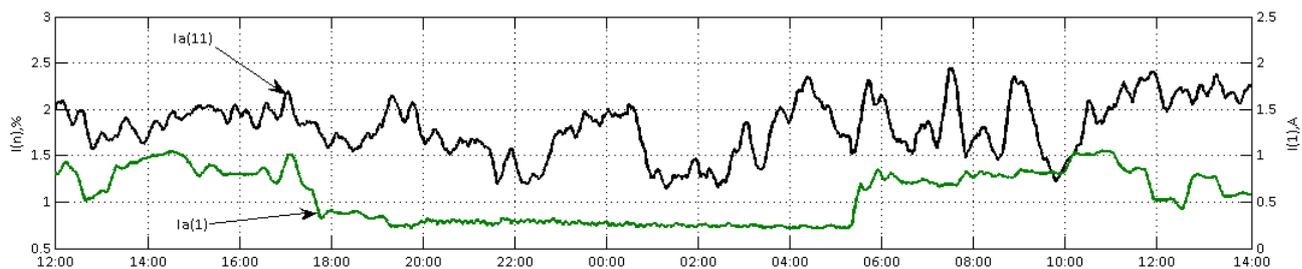


Рис. 5. Цех по переработке молока: 1-я и 11-я гармоники тока фазы А

На рисунке 6 представлены графики изменения коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений для фазы А питающего напряжения.

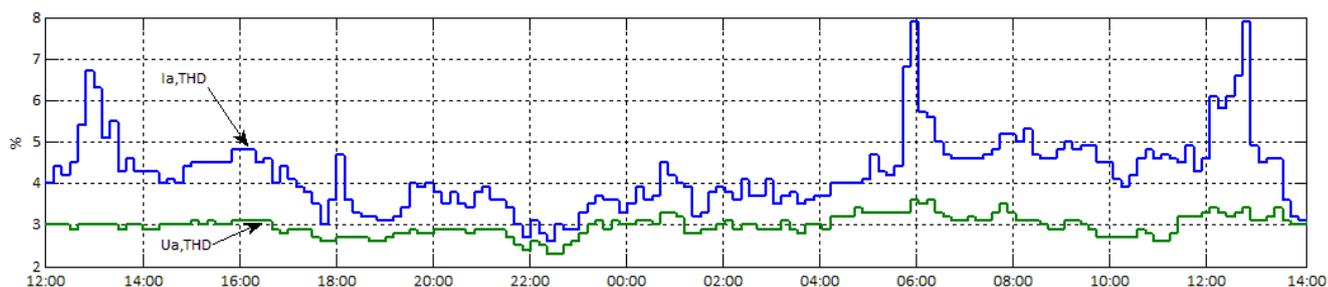


Рис. 6. Цех по переработке молока. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения (фаза А)

На рисунках 7, 8 показаны спектры средних значений гармоник токов и напряжений в фазах А, В, С в рабочее время.

Результаты измерений показывают, что уровень гармоник для напряжений и токов существенно различается. Наибольшие значения имеют токи третьей гармоники, а для напряжений – пятой и одиннадцатой гармоник.

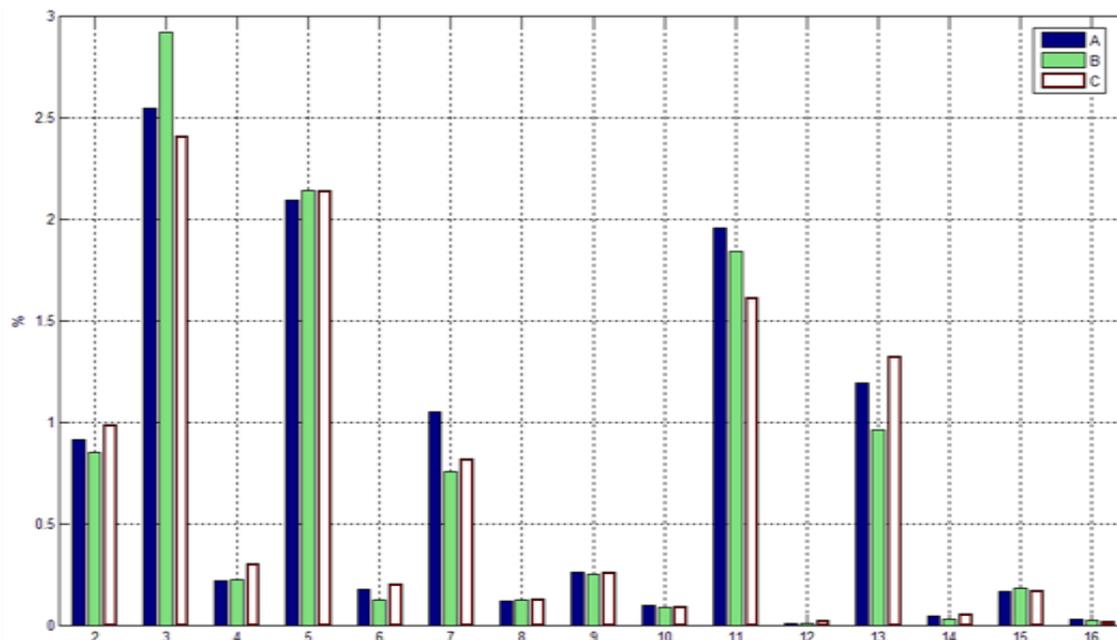


Рис. 7. Цех по переработке молока. Спектральный состав токов в дневное время

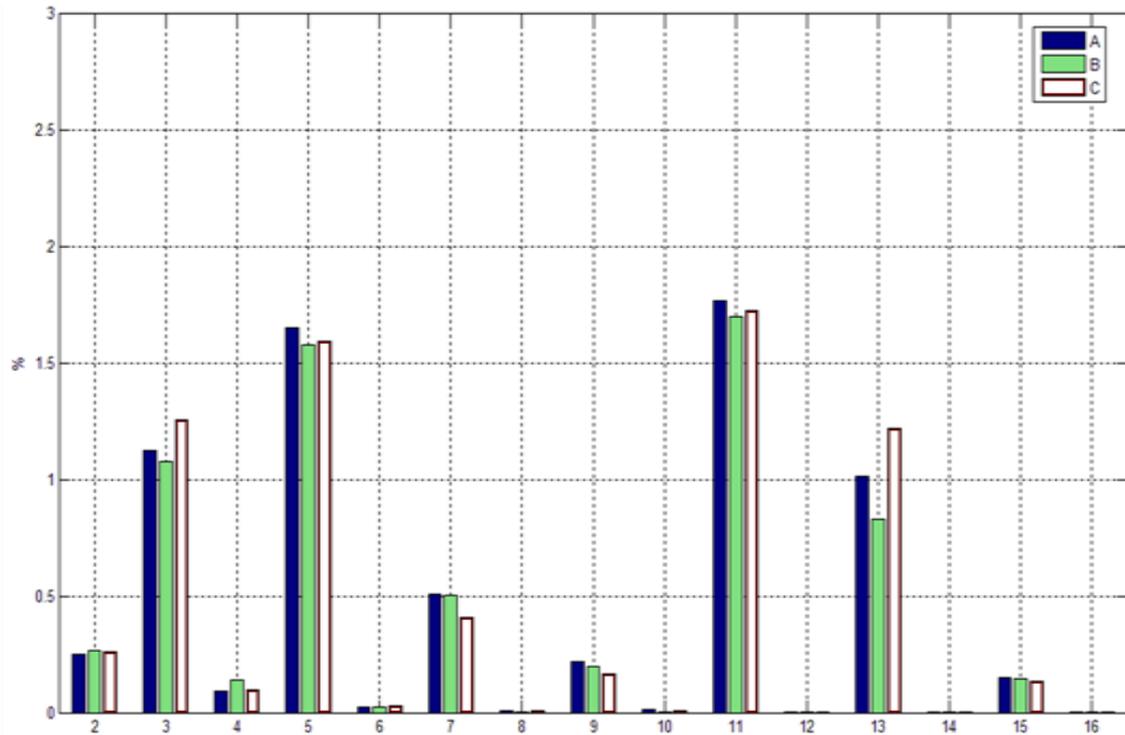


Рис. 8. Цех по переработке молока. Спектральный состав напряжений в дневное время

Птицефабрика. Предприятие энергоемкое, поэтому питание потребителей осуществляется от нескольких трансформаторных подстанций 10/0.4 кВ различной мощности.

Измерения проводились на двух трансформаторных подстанциях. К первой ТП подключены птичники, инкубатор, ветеринарный блок и электроцех. Установленная мощность трансформатора – 400 кВА. Общая нагрузка по фазам на момент измерений составила: фаза А – 220А, фаза В – 221А, фаза С – 226А. Обогрев птичников и инкубатора осуществляется от газовой котельной, поэтому основными электрическими нагрузками являются освещение помещений, вентиляция и наружное освещение. Освещение помещений птичников осуществляется с помощью ламп накаливания. Для регулирования освещенности используются тиристорные светорегуляторы с ручным управлением (выпуска 70–80 годов XX в). Загрузка трансформаторной подстанции зависит от этапа доразивания птицы.

На рисунках 9–11 показаны графики изменения относительных значений токов третьей, пятой и седьмой гармоник совместно с током нагрузки. Нагрузка на всех фазах практически симметрична, потому приводятся графики только для одной фазы – В.

Для гармонического состава токов характерно проявление 3-, 5- и 7-й гармоник – как следствие работы тиристорных регуляторов. Для гармонического состава напряжений доминирующими являются 5-я и 11-я гармоники вне зависимости от времени суток.

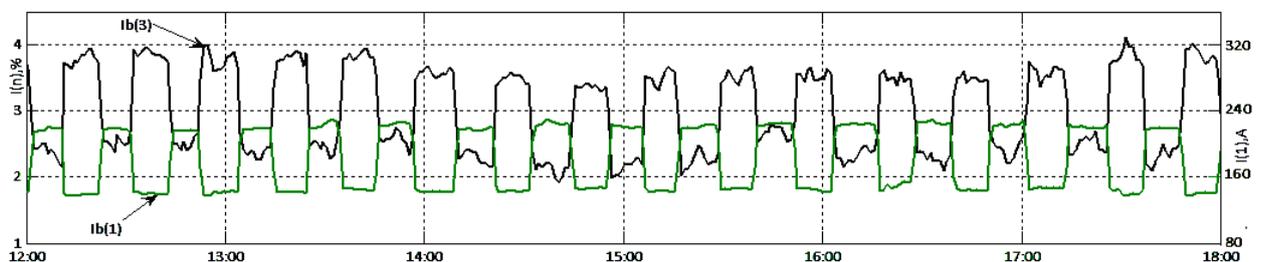


Рис. 9. Птицефабрика, 1-я ТП. 1-я и 3-я гармоники токов, фаза В

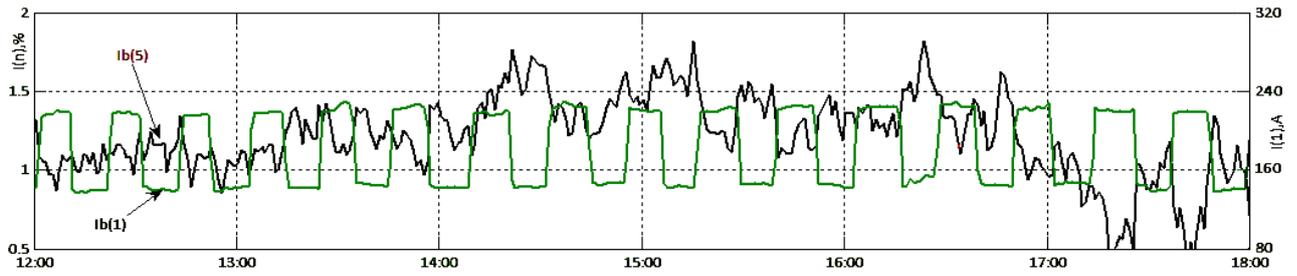


Рис. 10. Птицефабрика, 1-я ТП. 1-я и 5-я гармоники токов, фаза В

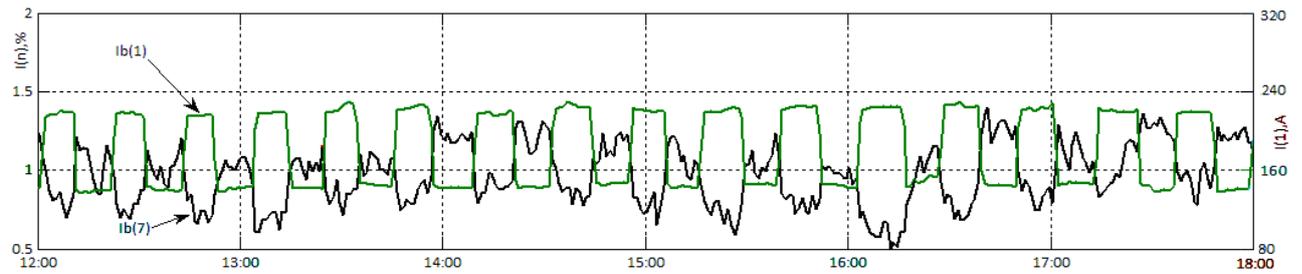


Рис. 11. Птицефабрика, 1-я ТП. 1-я и 7-я гармоники токов, фаза В

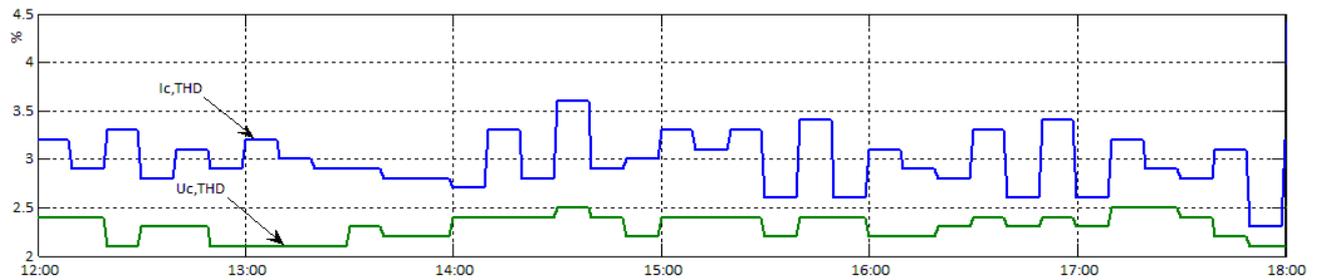


Рис. 12. Птицефабрика, 1-я ТП. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

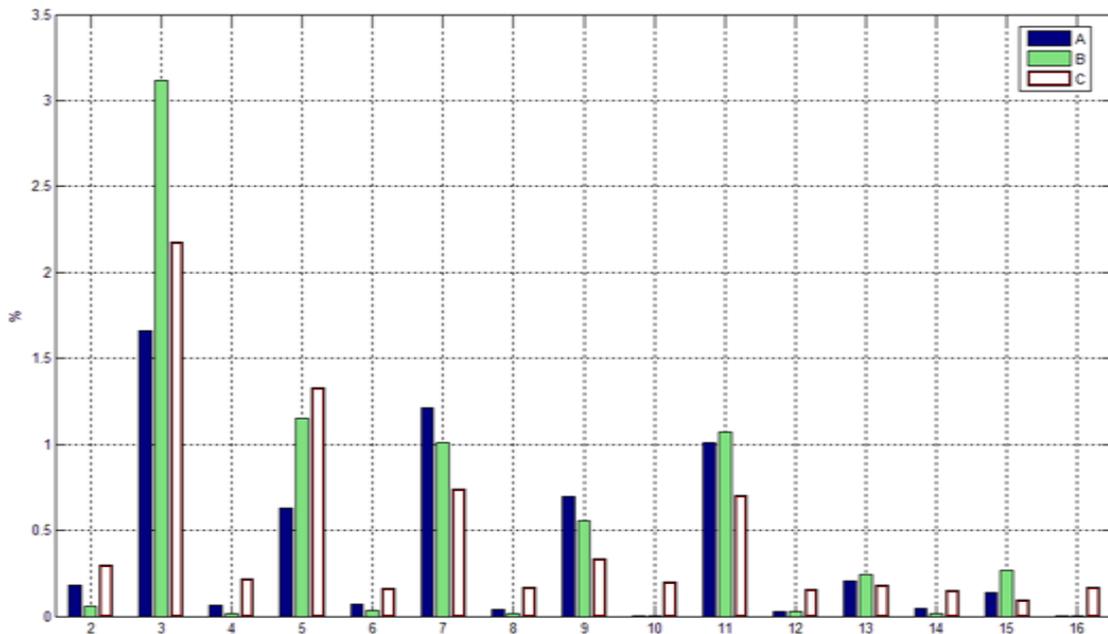


Рис. 13. Птицефабрика, 1-я ТП. Спектральный состав токов в рабочее время

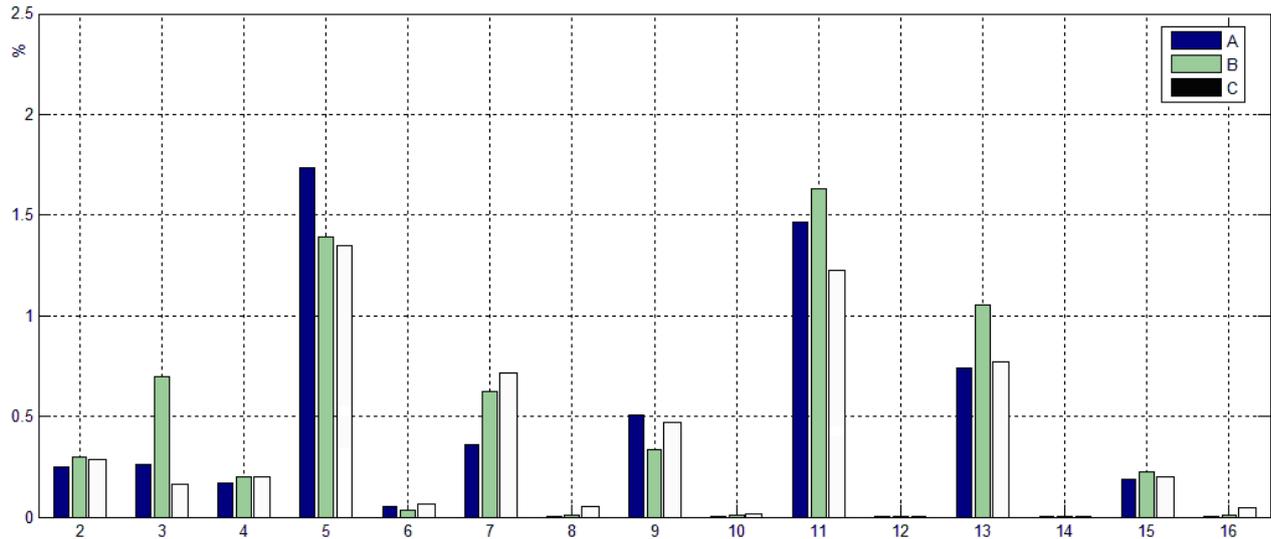


Рис. 14. Птицефабрика, 1-я ТП. Спектральный состав напряжений в ночное время

К подстанции 2 подключены новые птичники, построенные в 2004–2006 годах, в которых используется энергосберегающее оборудование и частично – энергосберегающие осветительные приборы. Установленная мощность трансформатора – 400 кВА. На момент измерений нагрузка по фазам составляла: фаза А – 17,8А, фаза В – 21,7А, фаза С – 23,5А. Основными электрическими нагрузками являются освещение помещений, вентиляция и наружное освещение. Предусмотрен локальный электрообогрев птичников, но измерения проводились в августе, обогрев еще не включался.

На рисунках 15, 16 показаны графики изменения относительных значений токов третьей и пятой гармоник совместно с током нагрузки.

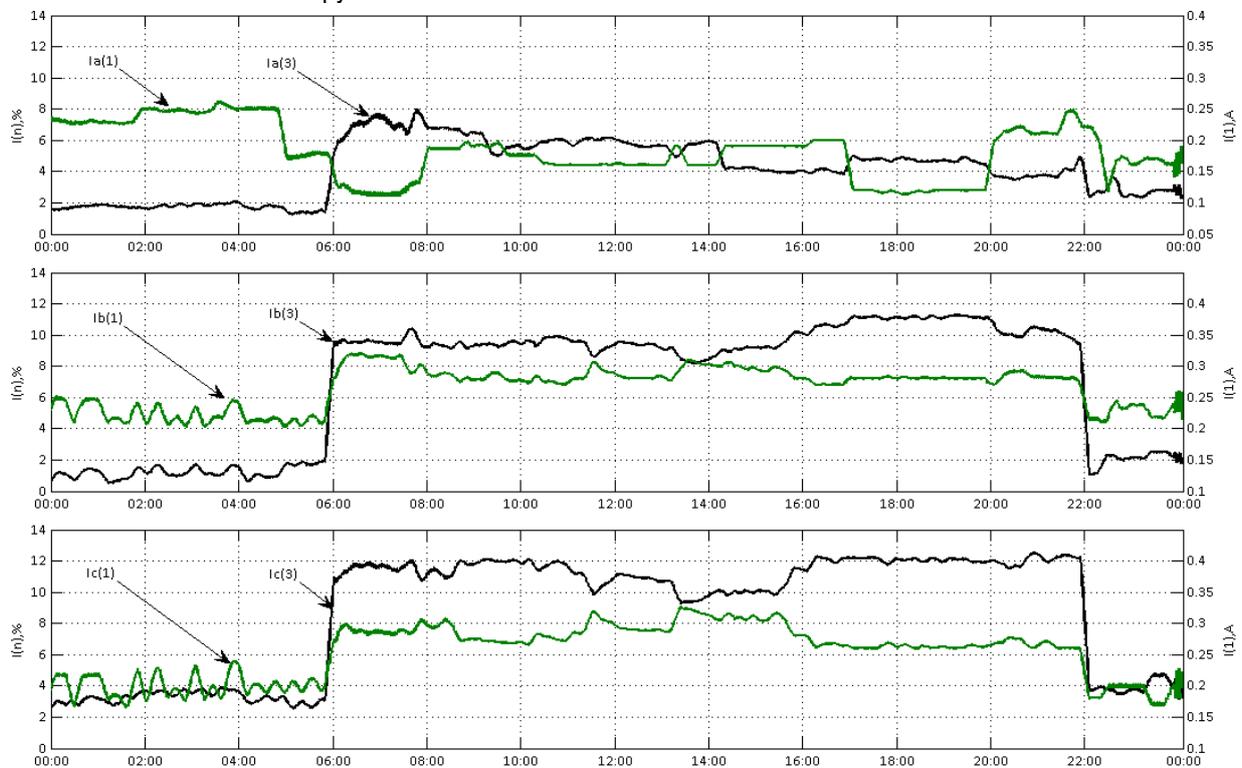


Рис. 15. Птицефабрика, 2-я ТП. 1-я и 3-я гармоники токов по фазам

Результаты измерений показывают, что на подстанции 2 относительный уровень 3-й и 5-й гармоник значительно выше, чем на подстанции 1. Кроме того, наблюдается существенная несимметрия загрузки фаз. Из графиков ясно видно, что в рабочее время несинусоидальность токов значительно возрастает. Это означает, что работающее оборудование является источником высших гармонических составляющих. На рисунке 17 показан график изменения коэффициента несинусоидальности для фазы С – именно для этой фазы несинусоидальность выражена наиболее ярко.

Таким образом, модернизация оборудования и переход на энергосберегающие технологии могут привести к ухудшению качества электроэнергии.

Спектры гармоник токов и напряжений показаны на рисунках 18, 19.

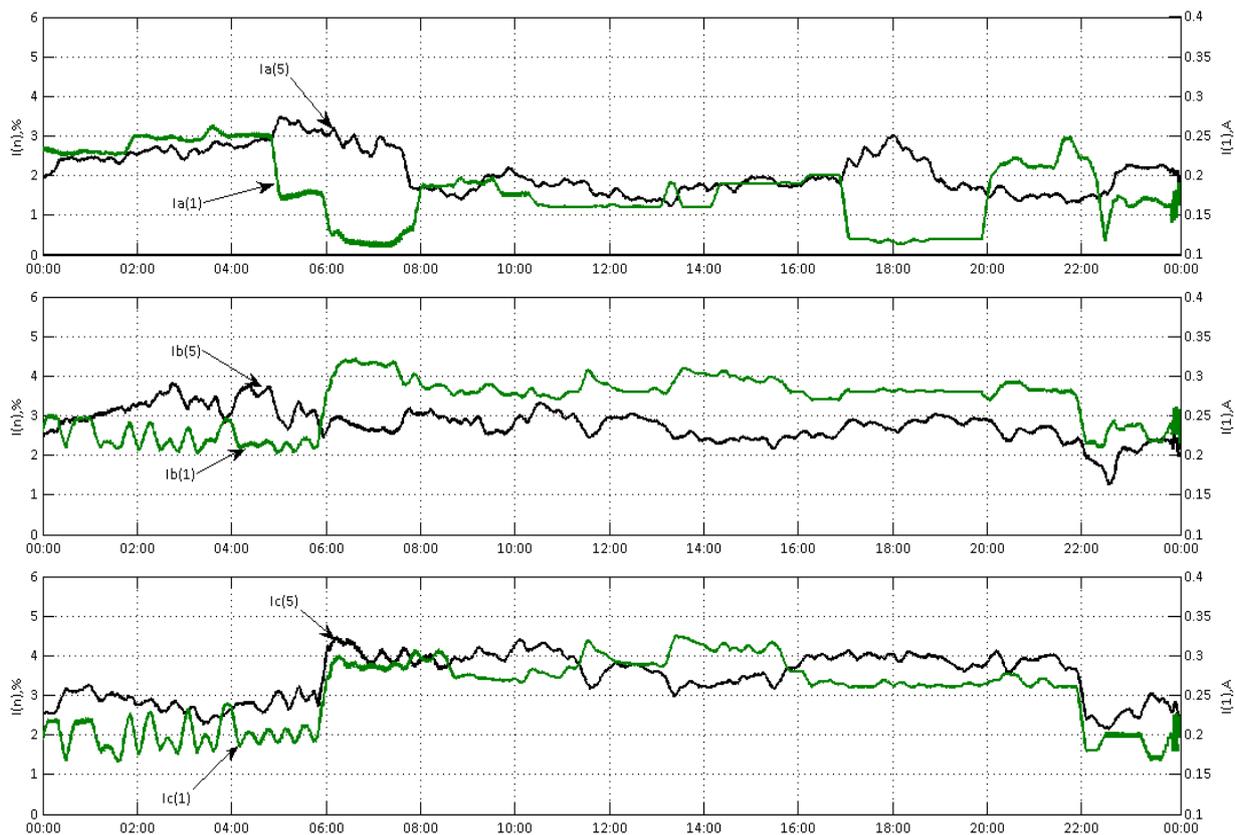


Рис. 16. Птицефабрика, 2-я ТП. 1-я и 5-я гармоники токов по фазам

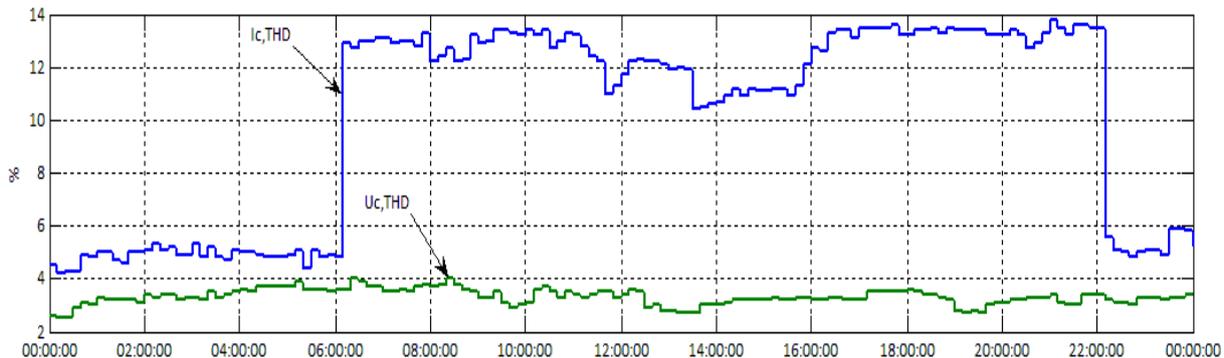


Рис. 17. Птицефабрика, 2-я ТП. коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения фазы С

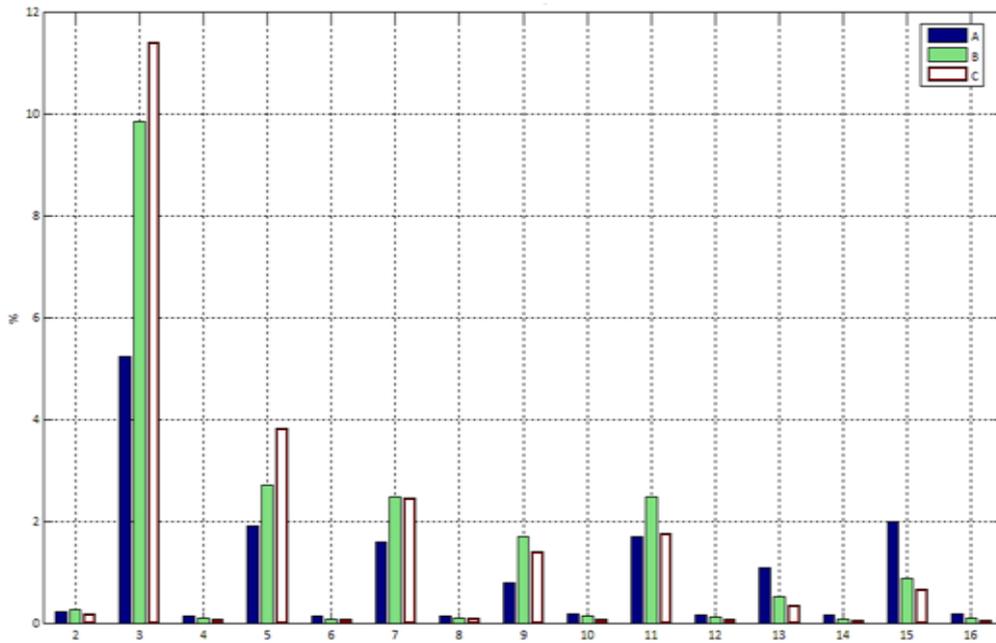


Рис. 18. Птицефабрика, 2-я ТП. Спектральный состав токов в рабочее время

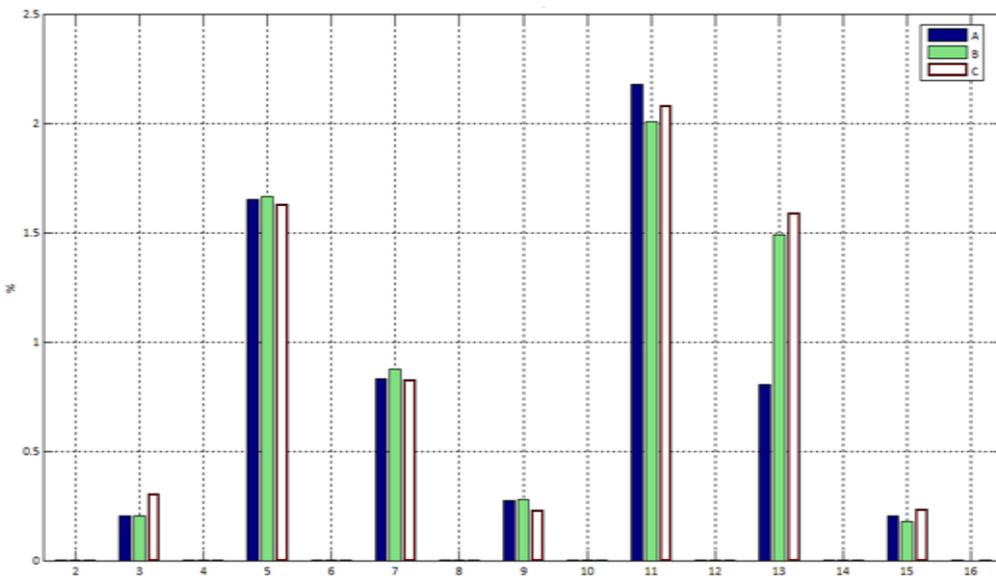


Рис. 19. Птицефабрика, 2-я ТП. Спектральный состав напряжений в рабочее время

Коттеджный поселок. Питание жилых домов осуществляется от подстанции 10/0,4 кВ. Мощность трансформатора 1000 кВА. Для таких потребителей характерен распределенный характер преимущественно однофазной нагрузки. Фазы загружены несимметрично. На рисунках 20–21 показаны графики изменения гармоник токов и напряжений в течение суток.

На рисунке 22 представлены графики изменения коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений для всех фаз питающего напряжения.

Большая часть нелинейных нагрузок в жилом секторе является однофазной, имеет малую мощность и распределена по сети. Уровень и состав гармоник зависят от времени суток и от дня недели. Наибольшее количество нагрузок, генерирующих гармоники высших порядков, наблюдается в вечернее время. Явно доминирующими являются: для токов – 3-я и 5-я гармоники, для напряжений – 5-я и 11-я гармоники.

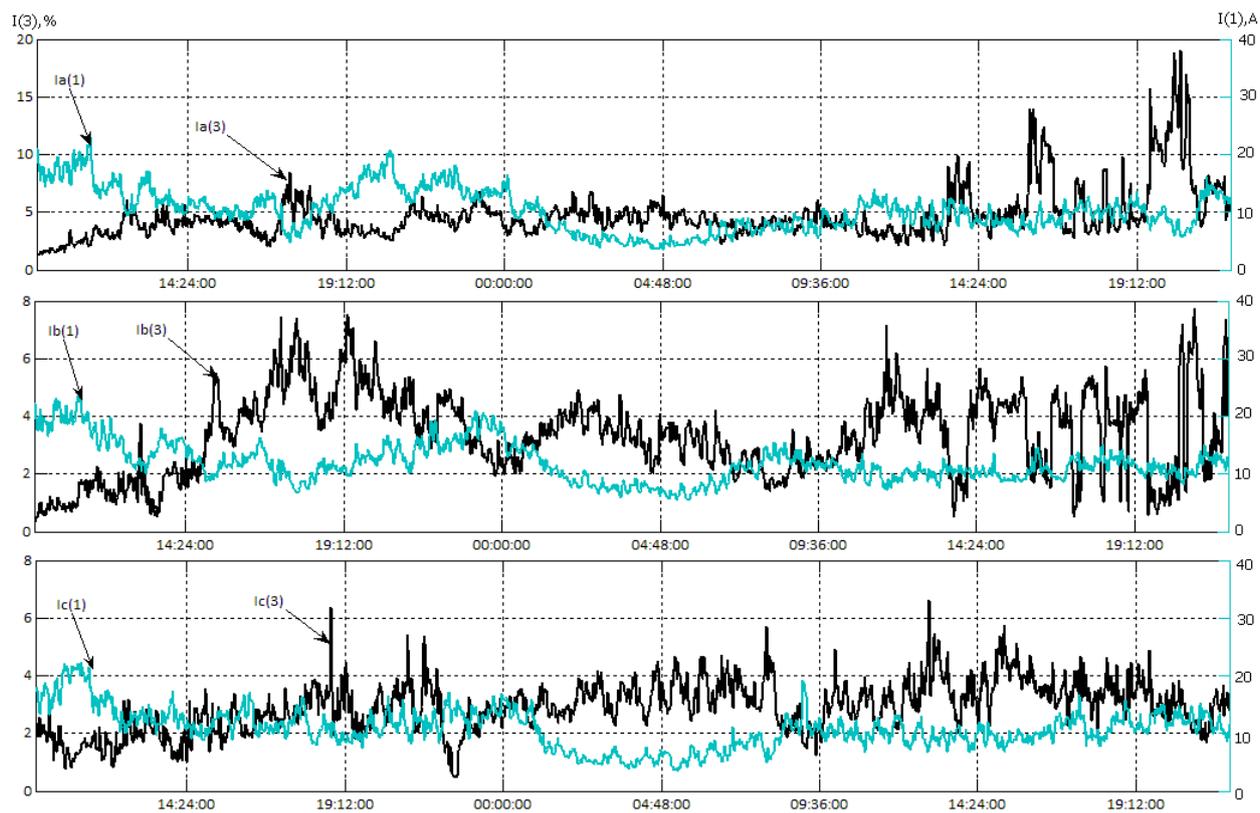


Рис. 20. Коттеджный поселок: 1-я и 3-я гармоники токов по фазам

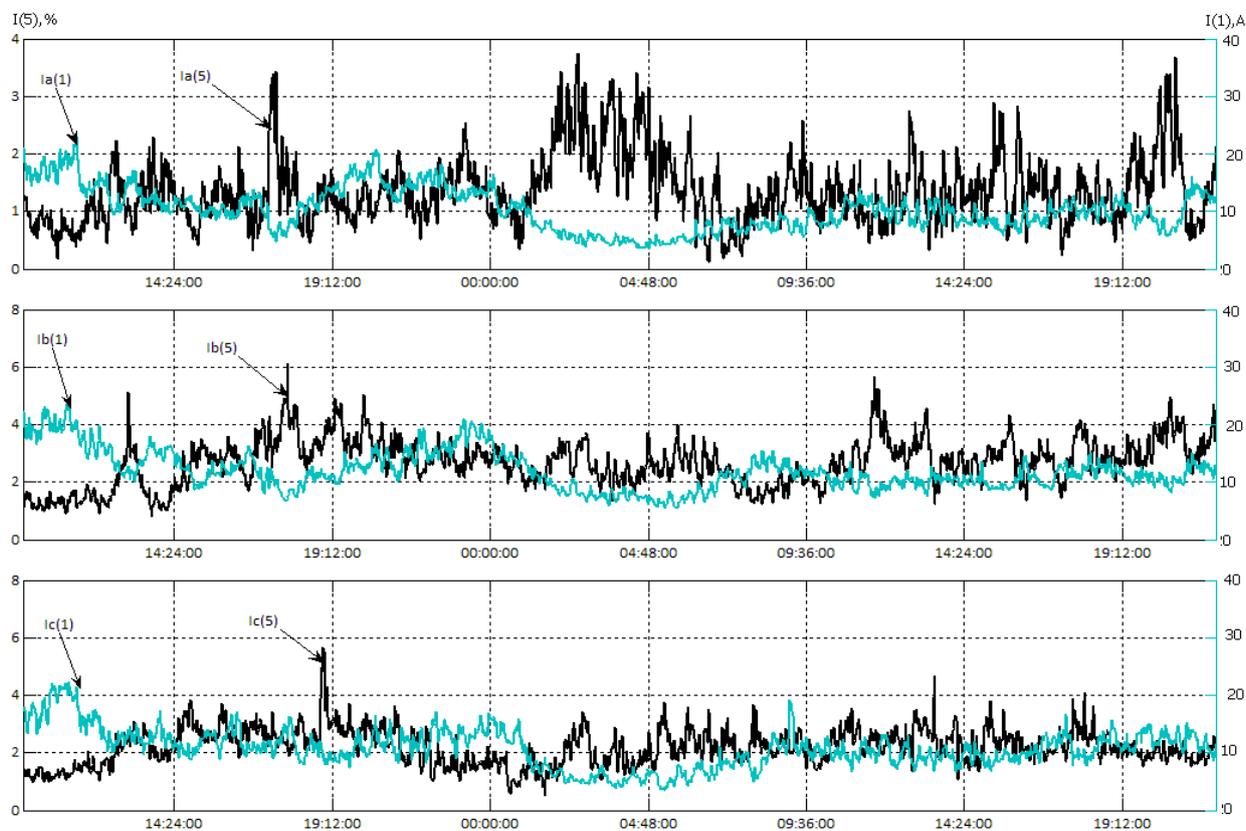


Рис. 21. Коттеджный поселок: 1-я и 5-я гармоники токов по фазам

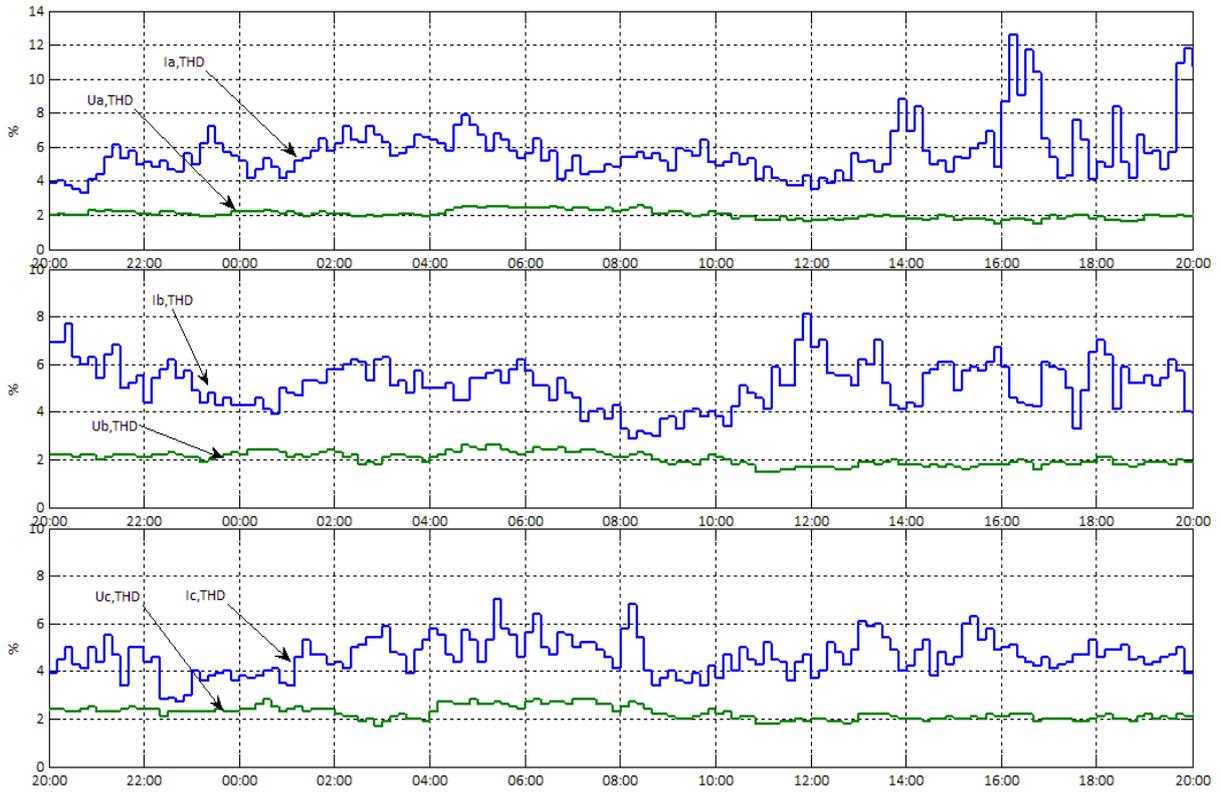


Рис. 22. Коттеджный поселок. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения

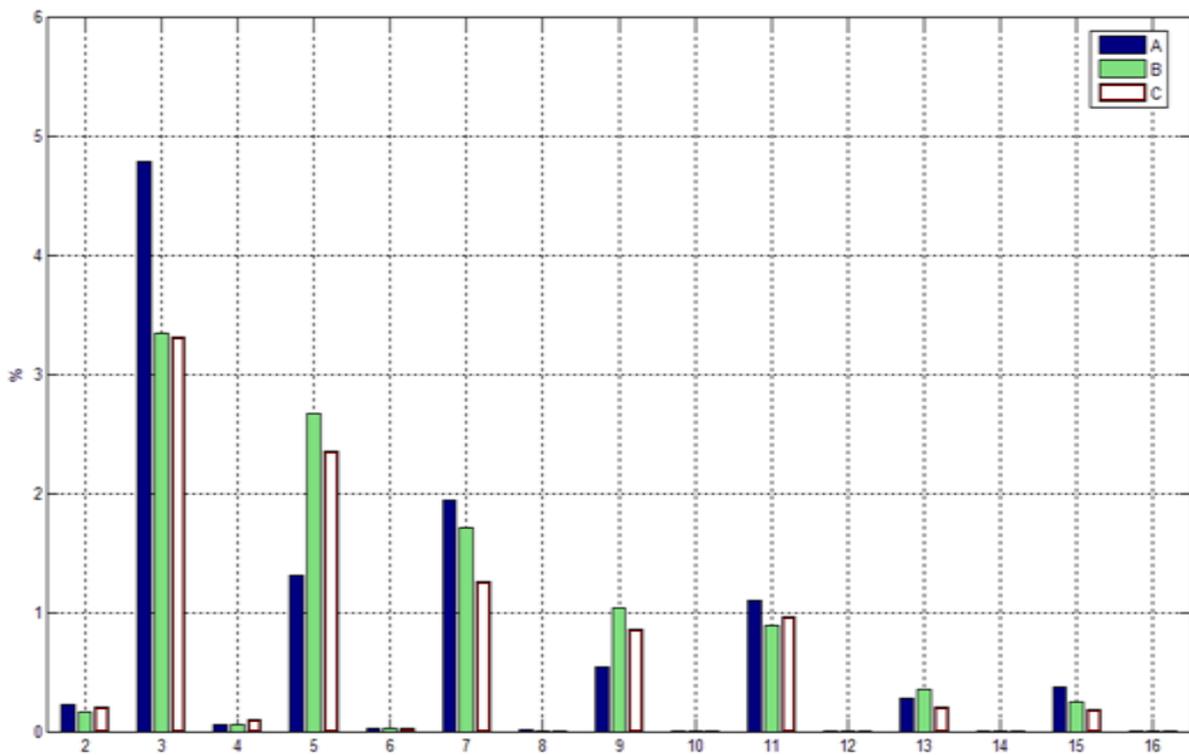


Рис. 23. Коттеджный поселок. Спектральный состав токов в рабочее время

На рисунках 23, 24 показан спектральный состав токов и напряжений в рабочее время, на рисунках 25, 26 – спектральный состав токов и напряжений в вечернее время. Следует отметить, что в вечернее время показатели качества напряжения не соответствуют ГОСТ 13109-97.

Преобладающими являются составляющие, имеющие частоту третьей гармоники, которые суммируются в нейтральном проводе. Серьезной проблемой системы электроснабжения коттеджного поселка являются большие уровни токов нейтрального провода. Дополнительным фактором, приводящим к еще большему увеличению тока в нейтральном проводе, является несимметрия нагрузки. Это приводит к увеличению неконтролируемых потерь. Большие токи нейтрального провода могут привести к его перегоранию. Кроме того, увеличивается нагрев обмоток силового трансформатора, и их изоляция может быть повреждена.

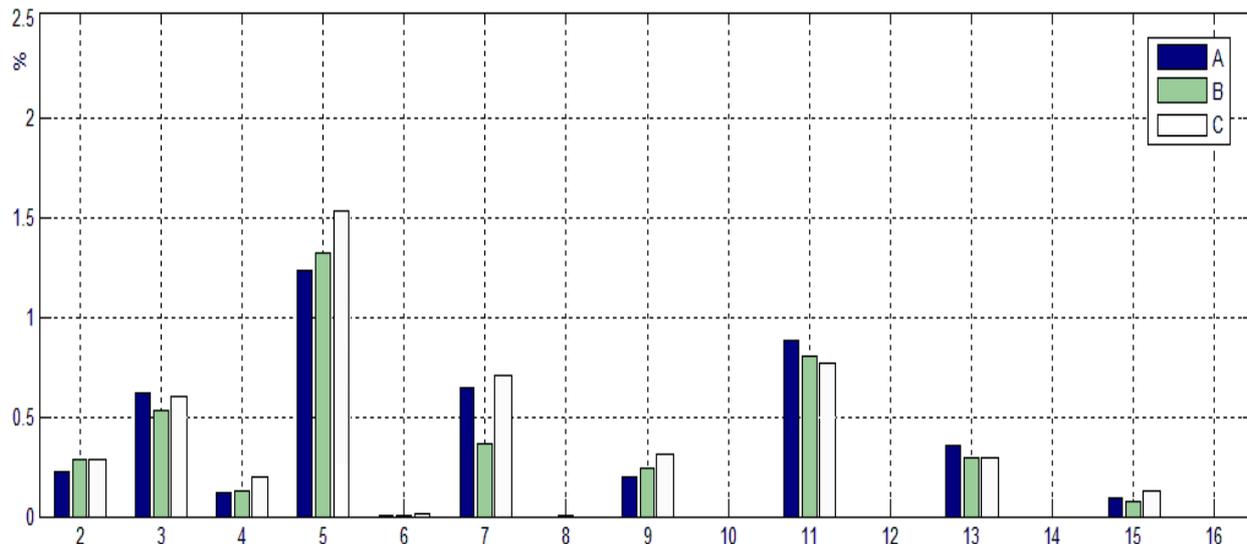


Рис. 24. Коттеджный поселок. Спектральный состав напряжений в рабочее время

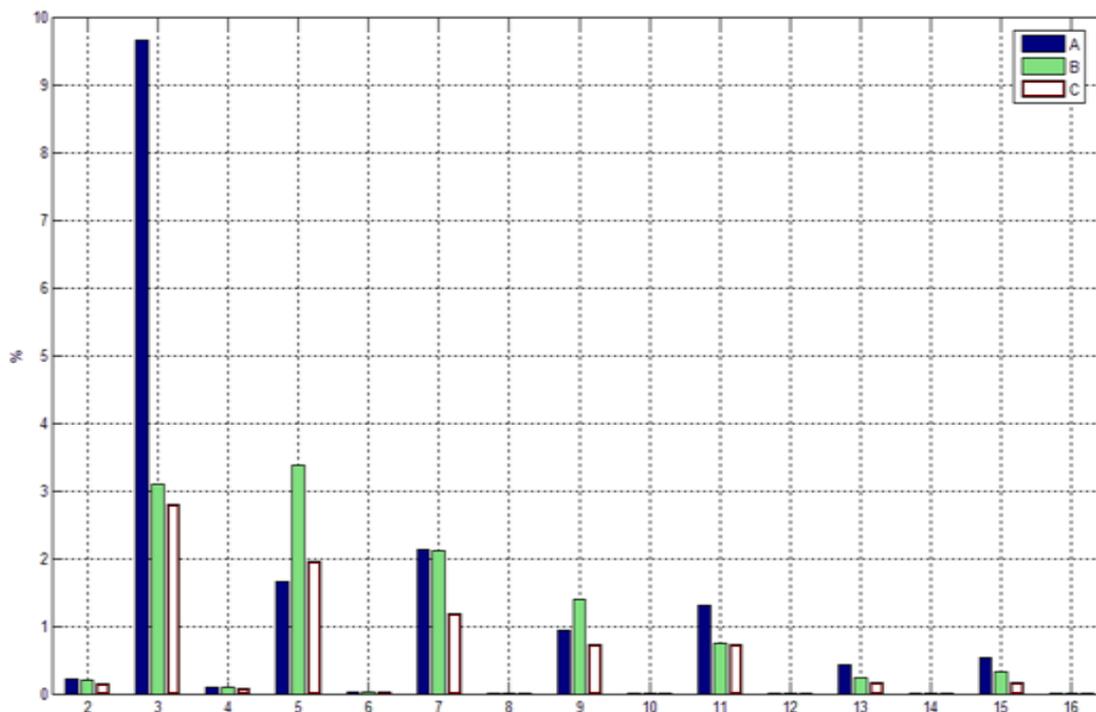


Рис. 25. Коттеджный поселок. Спектральный состав токов в вечернее время

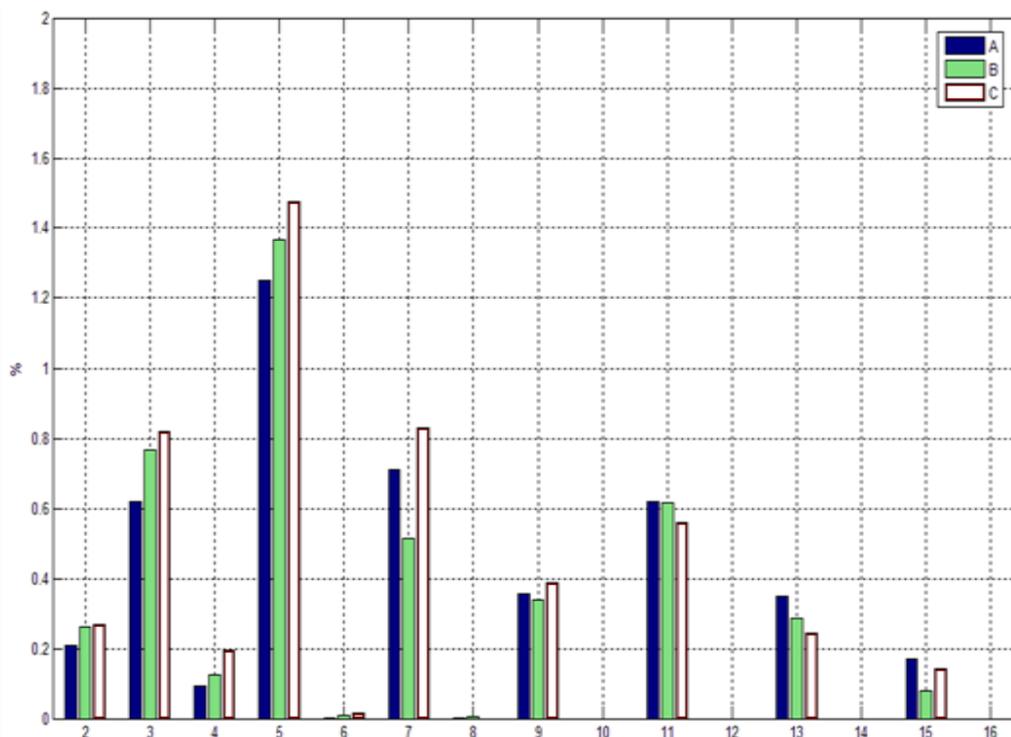


Рис. 26. Коттеджный поселок. Спектральный состав напряжений в вечернее время

Заключение

Проведенные измерения позволяют сделать следующие выводы.

1. Показатели качества электроэнергии обследованных потребителей в основном соответствуют требованиям ГОСТ 13109-97. В течение 90% времени уровень высших гармоник не превышает допустимых значений. Однако увеличение доли нелинейных нагрузок, вызванное широким использованием энергосберегающих осветительных приборов и импульсных источников питания, приведет к увеличению доли высших гармоник в спектрах токов и напряжений. Поэтому при модернизации оборудования и переходе на энергосберегающие технологии появится необходимость в мероприятиях по повышению качества электроэнергии и компенсации гармоник высших порядков.

2. Уровень высших гармоник тока зависит от мощности нагрузки, времени дня и дня недели. В рабочее время коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения значительно возрастают. Это означает, что источником высших гармонических составляющих является работающее оборудование.

3. Поскольку нагрузки в жилом секторе в подавляющем большинстве случаев однофазные, ток нейтрального провода может значительно превышать фазные токи даже при симметричной нагрузке. Это может привести к значительным дополнительным потерям. Есть вероятность перегрева и разрушения нулевых проводов линий, так как для нулевого провода никакими нормативными документами не предусматриваются аппараты защиты. Для обеспечения надежного электроснабжения в таких сетях требуется увеличение сечения нейтрального провода.

Авторы благодарят руководителей предприятий АПК Сухобузимского района Красноярского края за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.

2. Аррипага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер.с англ. – М: Энергоатомиздат, 1990.
3. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
4. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учеб. для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 632 с.
5. Жежеленко И.В., Плешков П.Г., Лю Г.П. Исследование уровней высших гармоник в сельских электрических сетях // Механизация и электрификация с.х. – 1985. – № 1. – С. 57–59.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт, 1997.



УДК 538.971.544.7

Л.Ю. Антипина, Т.П. Сорокина,
П.Б. Сорокин, О.П. Квашнина

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА НА ГРАФАНЕ, ДОПИРОВАННОМ АТОМАМИ ЛИТИЯ

В статье рассмотрен механизм сорбции молекулярного водорода на систему Li-графан. Показано, что данная система может сорбировать до 12 % вес. молекулярного водорода. Данный результат соответствует общепризнанным требованиям американского энергетического департамента (DOE) содержания адсорбированного водорода для его промышленного использования на транспорте (6–7 % вес.).

Ключевые слова: графан, сорбция, водород, литий.

L.Yu. Antipina, T.P. Sorokina,
P.B. Sorokin, O.P. Kvashnina

THEORETICAL RESEARCH OF THE MOLECULAR HYDROGEN ADSORPTION ON THE GRAPHANE WHICH IS DOPED BY THE LITHIUM ATOMS

The mechanism of the molecular hydrogen adsorption to the Li-graphane system is considered in the article. It is shown that such system can adsorb up to 12 % WT of the molecular hydrogen. The result meets the generally accepted standards of the American Department of Energy (DOE) on the adsorbed hydrogen storage for its industrial use in transportation (6-7 % WT).

Key words: graphane, sorption, hydrogen, lithium.

Введение. Отсутствие материала для эффективного хранения водорода – одна из основных проблем для его использования в качестве экологически чистого альтернативного топлива. Возможным решением этой проблемы является использования в качестве сорбента для водорода углеродных наноструктур в связи с их малым весом и большой удельной площади поверхности. Так, были опубликованы работы, посвященные исследованию нанотрубок [1,2], графена [3,4] и фуллеренов [5] как возможных эффективных сорбентов водорода. Однако данные системы показывают слишком маленькую энергию связи с адсорбированным водородом (~0,05 эВ/H₂), в то время как для эффективного использования в водородной энергетике значение энергии связи должно находиться в диапазоне 0,2 ~ 0,4 эВ/H₂.

С другой стороны, углеродные наноструктуры с адсорбированными на них атомами щелочных (Li, Na, K) [6–9] металлов (металлоорганические комплексы) показывают хорошую энергию адсорбции молекулярного водорода на атом металла (~0,2–0,6 eV), делая их перспективными в качестве объекта сорбции. В на-