ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Д. В. Филянин

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы – 36, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: daniel_f@rambler.ru

Рассмотрены вопросы возможности использования автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) для контроля гармонического состава кривых напряжения и тока в системах электро-снабжения с целью идентификации и оценки источников гармонических искажений. Рассмотрена структурная схема АСКУЭ промышленного объекта и ее основные компоненты. Предложен алгоритм расширения функциональных возможностей первичных измерительных преобразователей, позволяющий контролировать гармонический состав поставляемой электроэнергии, регистрировать мощность и энергию высших гармоник. Рассмотрены вопросы применения первичных измерительных преобразователей с регистрацией мощности и энергии высших гармоник в составе автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии.

Ключевые слова: АСКУЭ, несинусоидальные режимы, качество электроэнергии, высшие гармоники, идентификация источников искажений.

ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ

Д. В. Філянін

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги – 36, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: daniel_f@rambler.ru

Одним з найважливіших компонентів ринку електроенергії є його інструментальне забезпечення, яке являє собою набір систем, приладів, пристроїв, каналів зв'язку, алгоритмів, тощо для контролю і управління параметрами енергоспоживання та енергопостачання. Базою формування і розвитку інструментального забезпечення є автоматизовані системи контролю та обліку споживання електроенергії. Крім завдань контролю енергоспоживання і енергопостачання, автоматизовані системи контролю та обліку споживання електроенергії доцільно використовувати також для вирішення завдань контролю якості електроенергії, визначення винуватців гармонічних спотворень і визначення ступеня участі кожного суб'єкта електричної мережі в розподілі потужності вищих гармонік з метою підвищення якості та надійності електропостачання споживачів і коригування величини оплати за спожиту електроенергію. У даній публікації розглянуто питання можливості використання автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії для контролю гармонічного складу кривих напруги і струму в системах електропостачання з метою ідентифікації та оцінки джерел гармонічних спотворень. Розглянуто структурну схему автоматизованої системи контролю та обліку споживання електроенергії промислового об'єкта та її основні компоненти. Запропоновано алгоритм розширення функціональних можливостей первинних вимірювальних перетворювачів (лічильників електроенергії). Запропоновано алгоритм розширення функціональних можливостей локального пристрою збору та обробки даних з метою обчислення потужності гармонічних складових для «транзитних» елементів електричної мережі. Це дозволить контролювати гармонічний склад електроенергії, що постачається, реєструвати потужність і енергію вищих гармонік, що дозволить визначити порушників показників якості електроенергії та надати інформацію щодо реле чини та розподілу компенсаційних виплат суб'єктам електричної мережі. Розглянуто питання застосування первинних вимірювальних перетворювачів з функцією реєстрації потужності та енергії вищих гармонік в складі автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії.

Ключові слова: АСКОЕ, несинусоїдальні режими, якість електроенергії, потужності, вищі гармоніки, ідентифікація джерел спотворень.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Электроэнергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальных частоте, напряжении, токе и т. п. Поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электроэнергии, то есть, обеспечена электромагнитная совместимость оборудования с сетью. Единого определения, что такое качество электроэнергии нет [1].

Одним из самых важных компонентов рынка электроэнергии является его инструментальное обеспечение, которое представляет собой набор систем, приборов, устройств, каналов связи, алгоритмов и т. д. для контроля и управления параметрами энергопотребления и энергоснабжения. Базой формирования и развития инструментального обеспечения являются автоматизированные системы контроля и учета потребления электроэнергии (АСКУЭ).

Помимо задач контроля энергопотребления и энергоснабжения, АСКУЭ целесообразно использовать также для решения задач контроля качества электроэнергии, определения виновников гармонических искажений и определения степени участия

протоколы, которые обеспечивают возможность «прозрачной» передачи данных от счетчика к серверу БД. Кроме того, встроенное ПО микросервера обеспечивает самостоятельный опрос счетчиков, в соответствии с временным регламентом и запрограммированным сценарием опроса, а также экспорт накопленной информации в сервер БД в режиме сервера (по запросу) или клиента (по собственной инициативе).

Определения активной, реактивной и полной мощности, которые в настоящее время используются, основаны на знаниях, которые разработаны и согласованы еще в 40-х годах прошлого столетия пока форма сигналов тока и напряжения была синусоидальной [2].

В последние 50 лет произошли важные изменения, связанные с ростом числа электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками, а также развитие систем распределенной генерации. Это привело к росту уровня гармонических искажений в электрических сетях, что, в свою очередь, приводит к нарушению требований ДСТУ EN 50160:2014.

Традиционный парк измерительных приборов, откалиброван при частоте 50 Гц. То есть при вычислении мощности и, соответственно энергии, как интегральной характеристики, производится умножение мгновенных значений тока и напряжения. Если мгновенные значения напряжения и тока представить в виде ряда Фурье и учесть, что интегралы от синусоидальных функций за целое число периодов равны нулю, то:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (1)$$

где U_0, I_0 – значения постоянных составляющих тока и напряжения; U_k, I_k – действующие значения напряжения и тока k -й гармоники; φ_k – угол фазового сдвига между напряжением U_k и током I_k k -й гармоники.

Как правило, все счетчики реактивной энергии, в настоящее время реализуют следующий алгоритм измерения реактивной мощности:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (2)$$

где S – полная мощность; P – активная мощность.

Полная мощность S определяется как произведение действующих значений тока I и напряжения U :

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n I_k^2}, \quad (3)$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока; U_k и I_k – действующие значения напряжения и тока каждой k -й гармонической составляющей.

Объединяя (1) без учета постоянной составляющей U_0, I_0 и (2), получаем выражение для реактивной мощности:

$$Q = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n I_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k \right)^2} \quad (4)$$

Целый ряд исследований, проведенный с различными счетчиками электроэнергии, показал существенный рост погрешности учета с ростом уровня высших гармонических составляющих тока и напряжения [3–7].

Для повышения точности учета и распределения ответственности за нарушение гармонического состава электроэнергии возникает необходимость создания принципиально новой распределенной микропроцессорной системы учета электроэнергии с использованием технологии распределенных измерений, которая позволит в едином «абсолютном» времени определять величину и направление мощности разных гармоник для каждого субъекта электрической сети.

Основным компонентом современных АСКУЭ, носителем первичной базы измеренных величин потребления, является многофункциональный электронный счетчик электрической энергии с измерительными трансформаторами тока и напряжения. Счетчик измеряет, регистрирует и накапливает данные о потреблении и генерации активной и реактивной энергии и полной энергии в четырех квадрантах. Счетчик регистрирует максимумы мощности, формирует график электрической нагрузки и регистрирует кумулятивные максимальные интервальные мощности. Также современные электронные счетчики могут выполнять функции анализа качества энергии и формировать отчеты по ее качеству.

Для создания системы контроля качества электроэнергии с функцией идентификации источников гармонических искажений и определения степени участия субъектов электрической сети в распределении мощности высших гармоник требуется модификация алгоритмов работы счетчиков электроэнергии.

Большинство современных электронных счетчиков изготавливаются на базе сверхбольших больших интегральных схем (СБИС) производства фирмы Analog Devices. Эти комплектующие обладают разным набором функций, которые определяют сферу их применения (однофазные счетчики, трехфазные счетчики и т. п.) и цену. Среди них есть серии СБИС с возможностью мониторинга параметров качества электроэнергии, в частности, вычисление THD (Total Harmonic Distortion) по трем измерительным каналам тока и напряжения. Например, ADE9000 [8] и семейство ADE78xx [9]. К их особым функциональным возможностям относится наличие гибкого буфера для хранения выборок сигналов тока и напряжения с целью дальнейшей их обработки внешним сигнальным процессором в соответствии с ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012. В буфере хранится от 8 до 80 мс информации по каждому из каналов тока и напряжения в зависимости от частоты дискретизации. Для передачи данных на внешний сигнальный процессор предусмотрен специальный высокоскоростной интерфейс HSDC (High Speed Data Capture). В составе СБИС счетчиков электроэнергии интегрирован сигнальный процессор, но его возможности ограничены. На рис. 2 приведена схема подключения СБИС счетчика электроэнергии к внешнему сигнальному процессору (DSP).

Рисунок 2 – Схема подключения СБИС ADExxxx к внешнему сигнальному процессору DSP

Дальнейший гармонический анализ сигналов тока и напряжения проводится внешним сигнальным процессором по алгоритму, приведенному на рис. 3.

Для каждого n -го основного интервала измерения (10 периодов гармоники основной частоты [10]) производится выборка сигналов тока $i_n(t)$ и напряжения $u_n(t)$. Затем анализируется их спектральный состав с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ). В результате для n -го основного интервала измерения формируем матрицы спектров тока I_n и напряжения U_n . Затем сравниваются значения элементов матриц спектров тока и напряжения с предварительно внесенными в память устройства соответствующими допустимыми значениями тока $I_{k\text{доп}}$ и напряжения $U_{k\text{доп}}$ для каждой k -й гармонической составляющей. При соответствии значений гармонических составляющих допустимым нормам ($I_k \leq I_{k\text{доп}}$, $U_k \leq U_{k\text{доп}}$) производится выборка сигналов тока $i_{n+1}(t)$ и напряжения $u_{n+1}(t)$ для следующего $(n+1)$ -го основного интервала измерения и цикл спектрального анализа повторяется. В случае превышения значений гармонических составляющих тока и напряжения допустимых норм ($I_k > I_{k\text{доп}}$, $U_k > U_{k\text{доп}}$) проводится детальный спектральный анализ по гармоническим составляющим, значения которых превышают допустимые нормы, с использованием алгоритма Дискретного Преобразования Фурье (ДПФ) по периодам. Суть метода заключается в последовательном применении двух Преобразований Фурье: БПФ – для определения спектрального состава выборки сигнала (10 периодов гармоники основной частоты) и дальнейшая детализация по периодам гармоники основной частоты полученных точек спектра с помощью ДПФ [11]. Далее вычисляется активная мощность k -й гармоники на n -м основном интервале измерения P_{kn} и нарастающим итогом энергия k -й гармоники W_k . Полученные результаты и метка времени, соответствующая n -му основному интервалу измерения, в который возникло нарушение параметров качества электроэнергии, сохраняются в памяти счетчика для передачи на верхний уровень АСКУЭ, который зависит от конфигурации самой системы учета электроэнергии.

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма анализа сигналов тока и напряжения счетчиком

Кабельная линия является потребителем активной мощности гармонических составляющих и, соответственно, для составления баланса мощностей гармонических составляющих надо учитывать этот фактор [12]. Для этого необходимо производить измерения на ее обоих концах, то есть в точке общего подключения и на клеммах потребителя.

Определение виновников гармонических искажений и степени участия субъектов электрической сети в распределении мощности высших гармоник начинается на уровне ЛУСОД – в микросервере ИТЕК-web предусмотрена возможность вычисления мощности высших гармоник для «транзитных» субъектов электрической сети (трансформаторы, кабельные линии). Также расчет мощности высших гармоник для «транзитных» субъектов электрической сети может выполняться ПО верхнего уровня при непосредственном подключении счетчиков к серверу БД и/или конфигурации микросервера ИТЕК-web в режим «прозрачной» передачи данных со счетчиков на сервер БД. Блок-схема алгоритма вычисления мощности высших гармоник для «транзитных» субъектов электрической сети приведена на рис. 4.

Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма вычисления мощности высших гармоник для «транзитных» субъектов электрической сети

Полученные с первичных измерительных преобразователей данные по мощности и энергии высших гармоник обрабатываются ПО верхнего уровня. На основании расчетных данных по графикам мощностей высших гармоник в различных точках электрической сети разрабатывается перечень мероприятий по повышению качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

ВЫВОДЫ. С имеющимся на сегодняшний день парком счетчиков невозможно достоверно определить источник гармонических искажений.

Для решения задач контроля качества электроэнергии и определения степени участия каждого субъекта электрической сети в распределении мощности высших гармоник с целью повышения качества и надежности электроснабжения потребителей и корректировки величины оплаты за потребляемую электроэнергию целесообразно использовать автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии с возможностью учета мощности и энергии высших гармоник.

Необходимо расширение функциональных возможностей счетчиков электроэнергии с целью регистрации и хранения информации по мощности и энергии высших гармоник в точке учета;

Требуется расширение функциональных возможностей локальных устройств сбора и обработки данных с целью расчета мощности и энергии высших гармоник для «транзитных» субъектов электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. IEEE Standard 1459, – March 2010. 40 p.
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
4. Киселев В. В., Пономаренко И. С. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии. *Промышленная энергетика*. 2004. № 2. С. 40–45.
5. Соколов В. С. Как работают электросчетчики при низком качестве энергии. URL: <http://www.autex.spb.su/pdf/sokolov-2004.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).
6. Акимов Е. Г., Шулешко А. И. Индукционные и электронные счетчики – что лучше? *Энергосбережение*, 2005. № 5. С. 32–35.
7. Волошко А. В., Филянин Д. В. Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований. *Вісник Кременчуцького національного технічного університету імені Михайла Остроградського*, 2014. Вып. 4/(87). С. 38–43.
8. High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9000.pdf>. (дата обращения: 24.04.2017).
9. Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf. (дата обращения: 24.04.2017).
10. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). BSI, Approved 30 April 2009. 66 p.
11. Волошко А. В., Филянин Д. В. Применение алгоритмов Быстрого Преобразования Фурье и Дискретного Преобразования Фурье для обнаружения, локализации и оценки синусоидальности кривых тока и напряжения. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2017. № 3. С. 87–94.
12. Волошко А. В., Филянин Д. В. Определение источников искажения и степени участия каждого субъекта системы электроснабжения в распределении мощности высших гармоник. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України", 2015. Вып. 165. С. 14–15.

APPLICATION OF ASCA FOR THE PURPOSES
OF IDENTIFICATION AND ASSESSMENT SOURCES OF HARMONIC DISTORTION

D. Filyanin

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Pobedy, 36, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: daniel_f@rambler.ru

Purpose. One of the most important components of the electricity market is its instrumental support, which is a set of systems, appliances, devices, communication channels, algorithms, etc. for monitoring and controlling the parameters of energy consumption and power supply. The basis of the formation and development of instrumental support are automated systems of commercial account of electric power (ASCA). In addition to the purposes of controlling energy consumption and energy supply, ASCA is also advisable to use for solving problems of power quality control, identifying the sources of harmonic distortion and assessment the degree of participation of each subject of distribution system in the harmonics power distribution with aim to improve the quality and reliability of power supply of consumers and adjust the amount of payment for consumed electric power. **Methodology.** Software models of the electrical network with several harmonic sources and software models of electric counters with the features of metering of the power of harmonics was used. **Results.** In this paper, the questions the possibility of using automated ASCA to monitoring the voltage and current harmonic composition in distribution systems with aim to identify and assessment sources of harmonic distortion. The structural scheme of the ASCA of an industrial facility and its main components are considered. An algorithm is proposed for extension the features of electric counters, which allows to monitoring the harmonic composition of the supplied electric power, to registration the power and energy of higher harmonics. The issues of the use of electric counters with the registration of power and energy of higher harmonics as component of ASCA was considered. **Originality.** For the first time, algorithms were proposed for calculating the power and energy of harmonic components with electric counters. A method and algorithm for metering electricity consumption by "transit" elements of the distribution system (cable lines, transformers) are proposed. **Practical value.** Hardware and software system with the features of harmonic's power metering was developed.

Key words: ASCA, nonsinusoidal conditions, power quality, harmonics, identification of distortion sources.

REFERENCES

1. Zhezhelenko, I. V., Saenko, Yu. L. (2000), *Pokazateli kachestva elektroenergii i ih kontrol na promyshlennyykh predpriyatiyah* [Power quality parameters and their monitoring in industrial enterprises]. Energoatomizdat, Moscow, Russia.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, March 2010. IEEE Standard 1459, 40 p.
3. Zhelezko, Yu. S. (2009), *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moschnost. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power loss. Reactive power. Power quality: practical calculations guide], ENAS, Moscow, Russia.
4. Kiselev, V.V., Pnomarenko, I.S. (2004), *Vliyanie nesinusoidalnosti napryazheniya i toka na pokazaniya elektronnykh schetchikov elektroenergii* [Effect of non-sinusoidal voltage and current readings of digital electricity meters], *Promishlennaya Energetika*, no. 2, pp. 40-45.
5. Sokolov, V.S. (2004), *Kak rabotayut elektroschetchiki pri nizkom kachestve energii* [How electric power counters operate at low power quality], Available at: <http://www.autex.spb.su/pdf/sokolov-2004.pdf> (accessed April 24, 2017).
6. Akimov, E. G., Shuleshko, A. I. (2005), *Induktsionnyye i elektronnyye schetchiki – chto luchshe?* [Induction and electronic counters – which is better?], *Energoberegenie*, no. 5, pp. 32–35.
7. Voloshko, A. V., Filyanin, D. V. *Vliyanie kachestva elektroenergii na tochnost pokazaniy elektroschetchikov: obzor issledovaniy* [The impact of power quality on the accuracy of meter reading: a review of studies], *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 4, no. 87, pp. 38–43.
8. “High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC”, Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9000.pdf> (accessed April 24, 2017).
9. “Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information”, Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf (accessed April 24, 2017).
10. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008), Approved 30 April 2009, BSI, 66 p.
11. Voloshko, A. V., Filyanin, D. V. (2017) *Primenenie algoritmov Byistrogo Preobrazovaniya Fur'e i Diskretnogo Preobrazovaniya fur'e dlya obnaruzheniya, lokalizatsii i otsenki iskazheniya sinusoidalnosti krivyykh toka i napryazheniya* [Detection and localization of power quality disturbances based on Fast Fourier Transform and Discrete Fourier Transform], *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, no. 3, pp. 87–94.
12. Voloshko, A. V., Filyanin, D. V. (2015) *Opreделение источников искажения и степени участия каждого субъекта системы электроснабжения в распределении мощности высших гармоник* [Distortion source identification and impact of each subjects of power supply system at harmonics power distribution], *Transactions of the Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine"*, no. 165, pp. 14–15.

Стаття надійшла 01.06.2018.