

Д. В. Філянін¹, канд. техн. наук., ст. викладач, ORCID 0000-0003-3576-3633

В. П. Калінчик¹, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0003-4028-0185

О. В. Мейта¹, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0002-4132-5202

А. В. Волошко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6867-2060

В. В. Пирятинський¹, студент, ORCID 0000-0002-5673-8958

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ АСКОЕ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ

Одним з найважливіших компонентів ринку електроенергії є його інструментальне забезпечення, що являє собою набір систем, приладів, пристроїв, каналів зв'язку, алгоритмів і таке інше для контролю та управління параметрами енергоспоживання та енергопостачання. Базою формування та розвитку інструментального забезпечення є автоматизовані системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ). Крім завдань контролю енергоспоживання та енергопостачання, АСКОЕ доцільно використовувати також для вирішення завдань контролю якості електроенергії, визначення винуватців гармонійних спотворень та визначення ступеня участі кожного елемента електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік з метою підвищення якості та надійності електропостачання споживачів та коригування величини оплати за спожиту електроенергію. У цій публікації розглянуто питання щодо можливості використання АСКОЕ для контролю гармонійного складу кривих напруги та струму в системах електропостачання з метою ідентифікації та оцінки джерел гармонійних спотворень. Розглянуто структурну схему АСКОЕ промислового об'єкта з використанням комунікаційного сервера та її основні компоненти. Проведено короткий огляд найбільш використовуваних інтегральних схем, що застосовуються при розробці та виготовленні сучасних лічильників електроенергії або первинних вимірювальних перетворювачів. Запропоновано алгоритм розширення функціональних можливостей первинних вимірювальних перетворювачів за рахунок використання зовнішнього сигнального процесора, що дозволяє контролювати гармонійний склад електроенергії, реєструвати потужність і енергію вищих гармонік. Розглянуто питання застосування первинних вимірювальних перетворювачів та локальних пристроїв збору та обробки даних (ЛПЗОД) із реєстрацією потужності та енергії вищих гармонік у складі АСКОЕ.

Ключові слова: АСКОЕ, якість електроенергії, вищі гармоніки, потужність вищих гармонік, джерело гармонік.

Вступ. Одним з найважливіших компонентів ринку електроенергії є його інструментальне забезпечення, яке є набором систем, приладів, пристроїв, каналів зв'язку, алгоритмів і т. д. для контролю та управління параметрами енергоспоживання та енергопостачання. Базою формування та розвитку інструментального забезпечення є АСКОЕ.

Крім завдань контролю енергоспоживання та енергопостачання, АСКОЕ доцільно використовувати також для вирішення завдань контролю якості електроенергії, визначення винуватців гармонійних спотворень та визначення ступеня участі кожного суб'єкта електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік з метою підвищення якості та надійності електропостачання споживачів та коригування розміру платні за електроенергію.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є запропонування алгоритму розширення функціональних можливостей первинних вимірювальних перетворювачів, що дозволяє контролювати гармонійний склад електроенергії та реєструвати потужність і енергію вищих гармонік. Також розглянути питання застосування первинних вимірювальних перетворювачів з реєстрацією потужності і енергії вищих гармонік в складі АСКОЕ.

Матеріал і результати досліджень. Для вирішення завдань контролю якості електроенергії та визначення ступеня участі кожного елемента системи електропостачання (СЕП) в розподілі потужності вищих гармонік доцільно використовувати АСКОЕ.

Основним компонентом АСКОЕ є так званий первинний вимірювальний перетворювач, тобто лічильник електроенергії. Вся архітектура АСКОЕ будується «від лічильника». Залежно від кількості лічильників, їх типу, виду інтерфейсу («струмова петля» (CL), RS-485/RS-422, RS-232, GSM-модем, Power Line модем, тощо), віддаленості лічильників від місця збору інформації, наявності/відсутності каналів зв'язку, пропонується те чи інше рішення.

На промислових підприємствах встановлюється велика кількість лічильників. Тому, з метою зниження протяжності та кількості ліній зв'язку, а також оптимізації інформаційних потоків, виникає необхідність встановлення проміжного пристрою збору інформації – так званого локального пристрою

збору та обробки даних (ЛПЗОД), що виконує функцію маршрутизатора та пристрою первинної обробки даних. На рис. 1 наведено структурну схему АСКОЕ великого промислового об'єкта.

У НДІ «Енергія» спільно з НВП «Енергія+» розроблено сімейство мікросерверів ІТЕК-web, призначених для використання в АСКОЕ як ЛПЗОД.

Мікросервер ІТЕК-web призначений для забезпечення зв'язку та узгодження інтерфейсів між багатофункціональними електронними лічильниками та сервером бази даних (БД), а також самостійного опитування лічильників та зберігання даних, отриманих в результаті опитування лічильників у вбудованій енергонезалежній пам'яті. Спеціалізоване вбудоване програмне забезпечення (ПЗ) підтримує протоколи обміну даними з лічильниками IEC1107, DLMS, IEC1142, а також деякі нестандартні протоколи, які забезпечують можливість прозорої передачі даних від лічильника до сервера БД. Крім того, вбудоване програмне забезпечення мікросервера забезпечує самостійне опитування лічильників, відповідно до тимчасового регламенту та запрограмованого сценарію опитування, а також експорт накопиченої інформації в сервер БД у режимі сервера (за запитом) або клієнта (за власною ініціативою).

Опитування локальних вузлів обліку здійснює комунікаційний сервер під керуванням сервера БД. В якості сервера БД і комунікаційного сервера використовується сервер промислового виготовлення з обов'язковим дублюванням і резервуванням комерційної інформації.

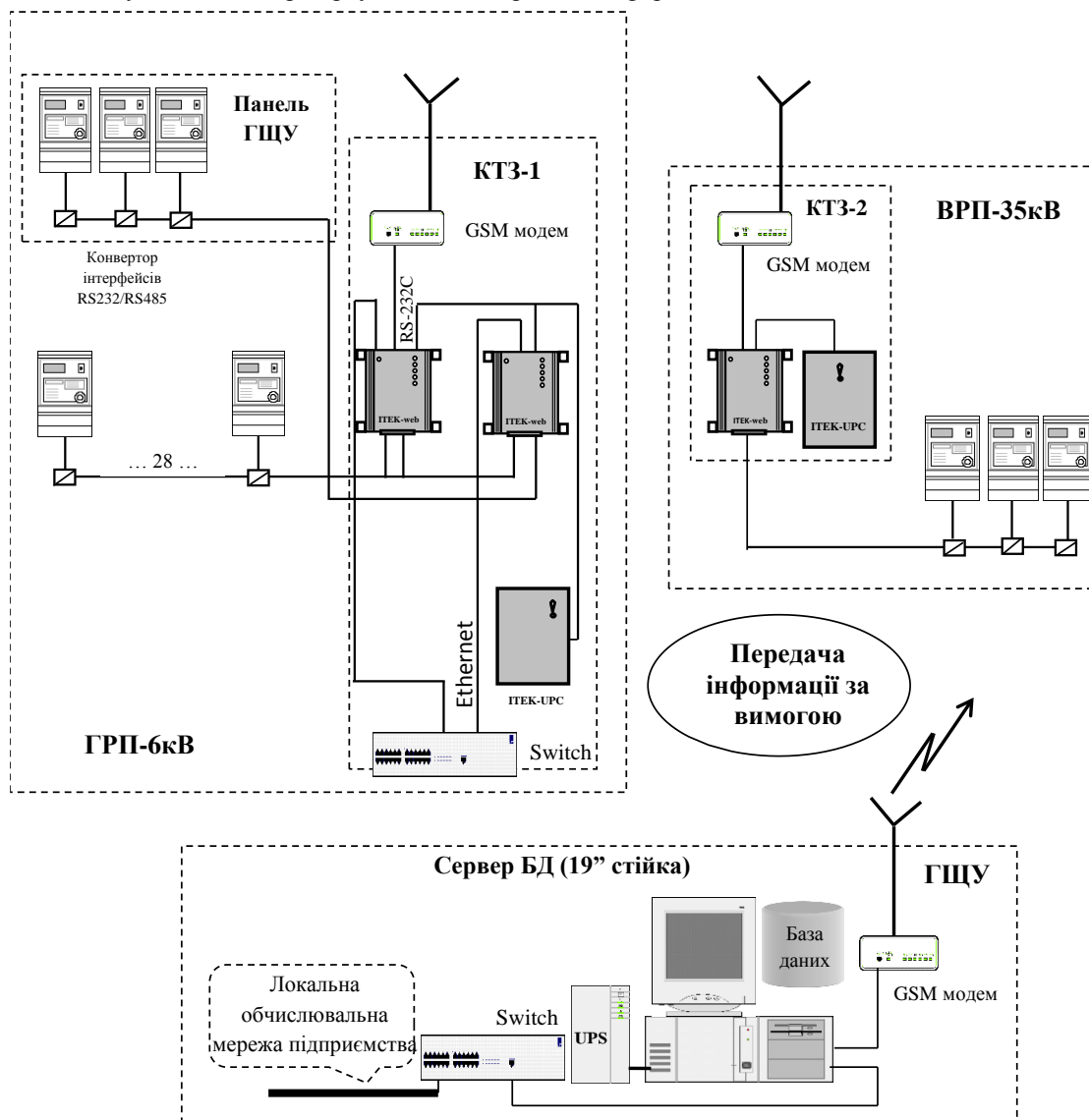


Рисунок 1. Архітектура АСКОЕ великого промислового об'єкта

Спеціальне програмне забезпечення верхнього рівня «Електро» (рис. 2) виконує опитування багатофункціональних лічильників електроенергії, вносить до БД інформацію про споживання електроенергії та споживаної потужності, веде базу вимірюваних параметрів якості електричної енергії, виконує функції зберігання і резервування БД, синхронізації системного часу, документування, тощо.

Традиційний парк вимірювальних приладів відкалібровано при частоті 50 Гц. Ціла низка досліджень, проведена з різними лічильниками електроенергії, показала істотне зростання похибки обліку зі зростанням рівня вищих гармонійних складових струму та напруги [1–5].

Для підвищення точності обліку та розподілу відповідальності за порушення гармонійного складу електроенергії виникає необхідність створення принципово нової розподіленої мікропроцесорної системи обліку електроенергії з використанням технології розподілених вимірювань, яка дозволить в єдиному «абсолютному» часі визначати величину та напрямок потужності різних гармонік для кожного елемента електричної мережі за принципами, зазначеними в [6].

Для створення системи контролю за якістю електроенергії з функцією ідентифікації джерел гармонійних спотворень та визначення ступеня участі елементів електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік потрібна модифікація алгоритмів роботи лічильників електроенергії.

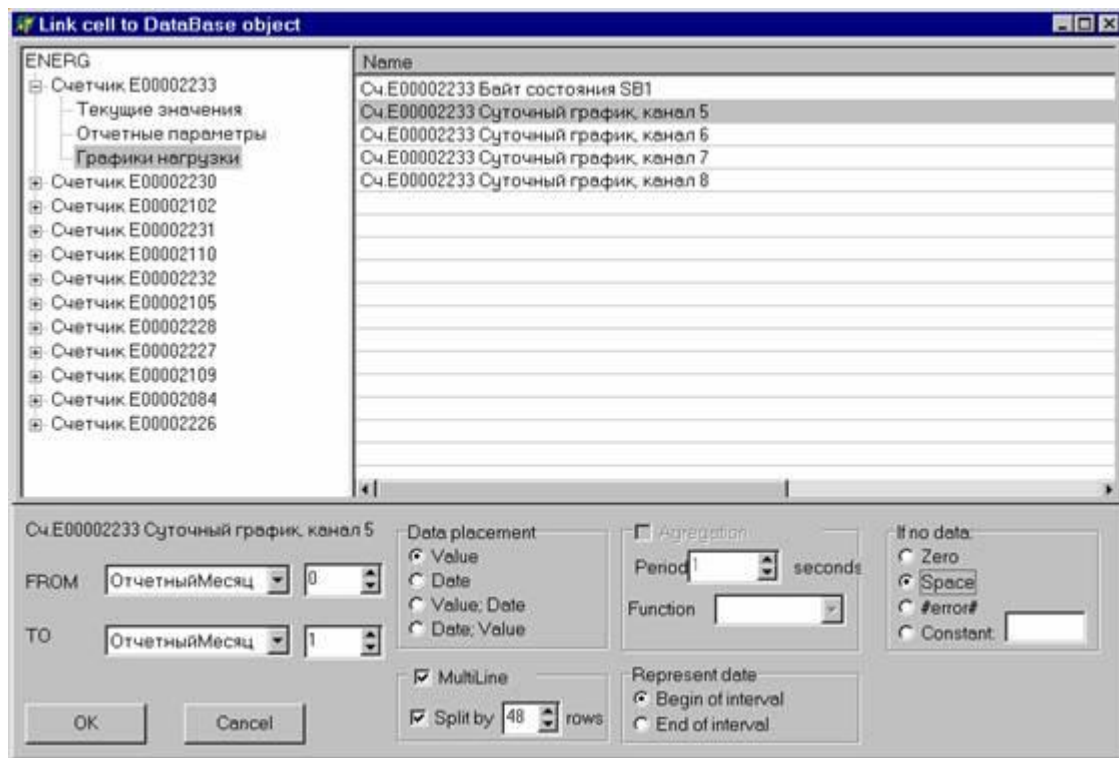


Рисунок 2. Вікно оболонки системи «Електро»

Більшість сучасних електронних лічильників виготовляються на базі надвеликих великих інтегральних схем (НВІС) виробництва фірми Analog Devices. Ці комплектуючі мають різний набір функцій, які визначають сферу їх застосування (однофазні лічильники, трифазні лічильники тощо) і ціну. Серед них є серія НВІС з можливістю моніторингу параметрів якості електроенергії, зокрема обчислення THD (Total Harmonic Distortion) по трьох вимірювальних каналах струму та напруги. Наприклад, ADE9000 [8] та сімейство ADE78xx [9]. До їх особливих функціональних можливостей відноситься наявність гнучкого буфера для зберігання вибірок сигналів струму та напруги з метою подальшої обробки їх зовнішнім сигнальним процесором відповідно до ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012. У буфері зберігається від 8 до 80 мс інформації по кожному з каналів струму та напруги залежно від частоти дискретизації. Для передачі даних на зовнішній сигнальний процесор передбачено спеціальний високошвидкісний інтерфейс HSDC (High Speed Data Capture). У складі НВІС лічильників електроенергії інтегрований сигнальний процесор, але його можливості обмежені. Для розширення функціональних можливостей НВІС лічильника електроенергії передбачено можливість його підключення до зовнішнього сигнального процесора (DSP).

Подальший гармонійний аналіз сигналів струму та напруги проводиться зовнішнім сигнальним процесором за алгоритмом, наведеним на рис. 3.

Для кожного n -го основного інтервалу вимірювання (10 періодів гармоніки основної частоти [9]) здійснюються вибірки сигналів струму $i_n(t)$ і напруги $u_n(t)$. Потім аналізується їх спектральний склад за допомогою ШПФ. В підсумку для n -го основного інтервалу вимірювання формуються матриці спектрів струму \mathbf{I}_n і напруги \mathbf{U}_n . Потім порівнюються значення елементів матриць спектрів струму і напруги з внесеними в пам'ять пристрою відповідними допустимими значеннями струму $I_{\text{кдоп}}$ і напруги $U_{\text{кдоп}}$ для кожної k -ї гармонічної складової.

За відповідності значень гармонійних складових допустимим нормам ($I_k \leq I_{k\text{доп}}$, $U_k \leq U_{k\text{доп}}$) проводиться вибірка сигналів струму $i_{n+1}(t)$ і напруги $u_{n+1}(t)$ для наступного $(n+1)$ -го основного інтервалу вимірювання і цикл спектрального аналізу повторюється. У разі перевищення значень гармонійних складових струму і/або напруги допустимих норм ($I_k > I_{k\text{доп}}$, $U_k > U_{k\text{доп}}$) проводиться детальний спектральний аналіз по гармонійним складовим, значення яких перевищують допустимі норми, з використанням алгоритму ДПФ по періодам [10]. Далі обчислюється активна потужність k -ї гармоніки на n -му основному інтервалі вимірювання P_{kn} і наростаючим підсумком енергія k -ї гармоніки A_k . Отримані результати і мітка часу, відповідна n -му основному інтервалу вимірювання, в якій виникло порушення параметрів якості електричної енергії, зберігаються в пам'яті лічильника для передачі на верхній рівень АСКОЕ, який залежить від конфігурації самої системи обліку електроенергії.

Кабельні лінії та трансформатори є споживачами активної потужності гармонійних складових і, відповідно, для складання балансу потужностей гармонійних складових треба враховувати цей фактор [11]. Для цього необхідно проводити вимірювання на їх обох кінцях, тобто в точці підключення до мережі живлення та з боку споживача.

Визначення винуватців гармонійних спотворень та ступеня участі суб'єктів електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік починається на рівні ЛПЗОД – у мікросервері ІТЕК-web передбачено можливість обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі (трансформатори, кабельні лінії). Також розрахунок потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі може виконуватись ПЗ верхнього рівня при безпосередньому підключенні лічильників до сервера БД та/або конфігурації мікросервера ІТЕК-web в режим «прозорій» передачі даних з лічильників на сервер БД. Блок-схему алгоритму обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі наведено на рис. 4.

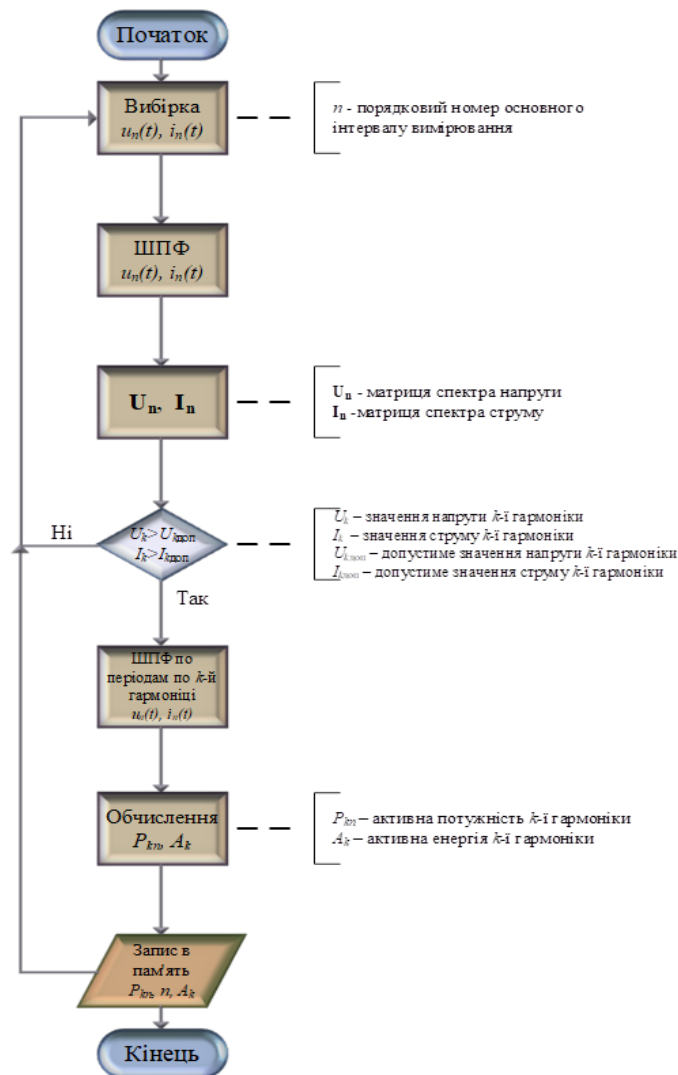


Рисунок 3. Блок-схема алгоритму аналізу сигналів струму і напруги лічильником

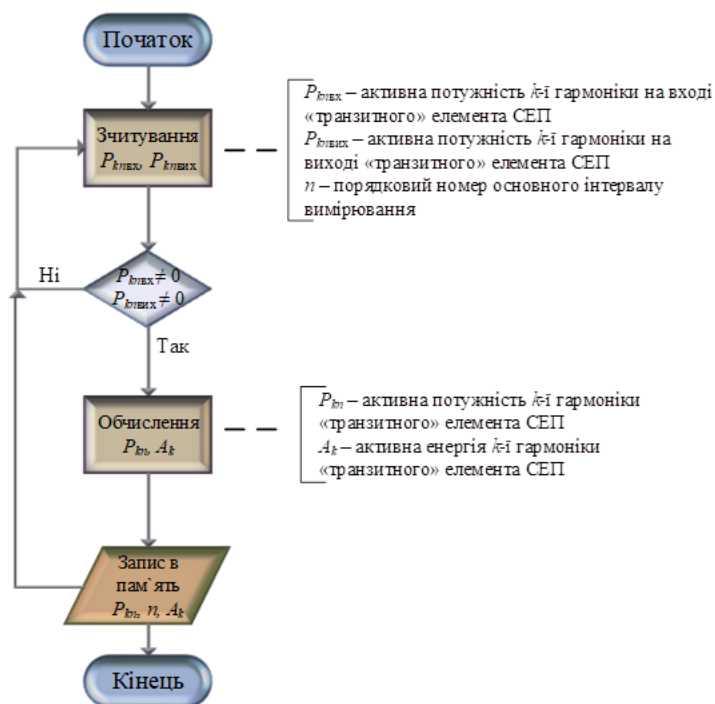


Рисунок 4. Блок-схема алгоритму обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів СЕП

Отримані з лічильників дані щодо потужності та енергії вищих гармонік обробляються ПЗ верхнього рівня та заносяться до шаблону звітних форм (рис. 5). З розрахункових даних із графікам потужностей вищих гармонік у різних точках електричної мережі розробляється перелік заходів щодо підвищення якості електроенергії.

| № п/п | Приєднання | осн/дубл | прием/отдача | № ліч. | Показання лічильника | | | Коеф. |
|-------|--------------|----------|--------------|------------|----------------------|------|---------|-------|
| | | | | | місяць | дата | поточні | |
| | 110кВ | | | | | | | |
| 18 | 1 АТ-1 110кВ | | прм | 0001391998 | | | | 2 |
| 19 | 2 АТ-1 110кВ | | отд | 0001391998 | | | | 2 |
| 20 | 3 АТ-2 110кВ | | прм | 0001001475 | | | | 2 |
| 21 | 4 АТ-2 110кВ | | отд | 0001001475 | | | | 2 |
| 22 | 5 ОВ 110 | | прм | 0001391999 | | | | 2 |
| 23 | 6 ОВ 110 | | отд | 0001391999 | | | | 2 |

Рисунок 5. Шаблон звіту ПЗ «Електро» на базі MS Excel

Висновки:

- з наявним на сьогодні парком лічильників неможливо достовірно визначити джерело гармонійних спотворень;
- для вирішення завдань контролю якості електроенергії та визначення ступеня участі кожного елемента електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік доцільно використовувати АСКОЕ з можливістю обліку потужності та енергії вищих гармонік;
- необхідне розширення функціональних можливостей лічильників електроенергії з метою реєстрації інформації щодо потужності та енергії вищих гармонік у точці обліку;
- потрібно розширення функціональних можливостей локальних пристроїв збору та обробки даних з метою розрахунку потужності та енергії вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі.

1.Список використаної літератури

1. Ю. С. Железко, *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов*, М.: ЭНАС, 2009.
2. В. В. Киселев, И. С. Пономаренко, “Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии”, *Промышленная энергетика*, №2, с. 40-45, 2004.
3. В. С. Соколов, “Как работают электросчетчики при низком качестве энергии” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/automation/lcard/sokolov-2004.pdf>
4. Е. Г. Акимов, А. И. Шулешко, “Индукционные и электронные счетчики – что лучше?”, *Энергосбережение*, №5, с. 32–35, 2005.
5. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, Випуск 4(87), с. 38–43, 2014.
6. D. Filyanin, “Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using the discrete fourier transform on periods” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2, с. 110-119, 2018.
7. Analog Devices, “High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC”, ADE9000 datasheet Rev. A, 2017.
8. Analog Devices, “Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information”, ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878 datasheet Rev. H, 2014.
9. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, IEC 61000-4-30:2008 Approved 30 April 2009.
10. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “Применение алгоритмов Быстрого Преобразования Фурье и Дискретного Преобразования Фурье для обнаружения, локализации и оценки синусоидальности кривых тока и напряжения” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №3, с. 87–94, 2017.
11. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “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*, Вып.165, с. 14–15, 2015.

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633
V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4028-0185
O. Meita¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4132-5202
A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6867-2060
V. Pyriatynskiy¹, student, ORCID 0000-0002-5673-8958
¹National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF ASCA TO SOLVE THE PROBLEMS OF HARMONIC DISTORTIONS SOURCES IDENTIFICATION

One of the most important components of the electricity market is its instrumental support, which is a set of systems, instruments, devices, communication channels, algorithms, etc. To control and manage the parameters of energy consumption and energy supply. The basis for the formation and development of instrumental support is the automated systems of commercial account of electric power (ASCA). In addition to the tasks of monitoring energy consumption and power supply, it is also advisable to use ASCA to solve the tasks of monitoring the power quality, identifying the culprits of harmonic distortions and determination the degree of participation of each element of the distribution system in the distribution of higher harmonics power in order to improve the quality and reliability of power supply consumers and adjust the amount of payment for consumed electricity. This paper discusses the issues of the possibility of ASCA for monitoring the harmonic set of voltage and current curves in

distribution systems in order to identify and assess of harmonic distortion sources. The block diagram of an industrial facility ASCA and its main components are considered. An algorithm for expanding the functionality of electricity meters is proposed, which makes it possible to control the harmonic composition of the supplied power, to register the power and energy of higher harmonics. Considered are the issues of using counters with recording the power and energy of higher harmonics as part of the ASCA.

Key words: ASKUE, power quality, higher harmonics, power of higher harmonics, harmonics source.

References

- 1.Yu. S. Zhelezko, *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moschnost. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power loss. Reactive power. Power quality: practical calculations guide], ENAS, Moscow, Russia, 2009.
- 2.V. V. Kiselev, I. S. Pnomarenko, “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, 2004.
- 3.V. S. Sokolov, Kak rabotayut elektroschetchiki pri nizkom kachestve energii [How electric power counters operate at low power quality], Available at: <http://www.autex.spb.su/automation/lcard/sokolov-2004.pdf>
- 4.E. G. Akimov, A. I. Shuleshko, “Induktsionnyie i elektronnyie schetchiki – chto luchshe? [Induction and electronic countrs – which is better?]”, *Energoberegenie*, no. 5, pp. 32–35, 2005.
- 5.A. V. Voloshko, D. V. Filyanin, “ 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 Ostrohradskiy National University*, vol. 4, no. 87, pp. 38–43, 2014.
- 6.D. Filyanin, “Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using the discrete fourier transform on periods” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2, с. 110-119, 2018.
- 7.Analog Devices, “High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC”, ADE9000 datasheet Rev. A, 2017.
- 8.Analog Devices, “Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information”, ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878 datasheet Rev. H, 2014.
- 9.*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, IEC 61000-4-30:2008 Approved 30 April 2009.
- 10.A. Voloshko, D. Filyanin, “Detection and localizatin of power quality disturbanses based on fast fourier transform and discrete fourier transform”, *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, no. 3, pp. 87–94, 2017.
- 11.A. Voloshko, D. Filyanin, “Ddistortion source identification and impact of each subjects of power supply system at harmonics power distribution”, *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petro Vasilenko. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine"*, no. 165, pp. 14–15, 2015.

Надійшла: 4.02.2023
Received: 4.02.2023