

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

НІКІТІНА АЛЬОНА ВІКТОРІВНА



УДК 621.316.1:621.317

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ  
ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ  
МЕРЕЖАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Кременчук – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент  
**Прус В'ячеслав В'ячеславович**, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри електричних машин і апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Розен Віктор Петрович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами

кандидат технічних наук, професор  
**Плешков Петро Григорович**, Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, м. Кропивницький, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Захист відбудеться 28 квітня 2021 р. о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: ауд. 1122, корпус № 1, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600) і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 за електронною адресою: [http://www.kdu.edu.ua/spec\\_rada/avtoref\\_recall.php?id\\_r=3](http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/avtoref_recall.php?id_r=3).

Автореферат розісланий 26 березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к. т. н., доц.



А. В. Некрасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблемою розподільних мереж низької напруги промислових підприємств є високий рівень гармонік поряд зі значною несиметрією напруги, що має суттєвий спільний вплив на режими роботи й електромагнітну сумісність підключених до них споживачів. Причина цього явища полягає в тому, що, як правило, практично всі реальні потужні споживачі електричної енергії працюють у режимах пофазної асиметрії навантажень при збільшених величинах гармонік струму внаслідок нелінійності їх характеристик. Аналогічне можна сказати й про пофазне навантаження побутових комунальних мереж, переважно через вплив імпульсних джерел живлення персональних комп'ютерів, нерівномірне навантаження фаз тощо. Через це зростають втрати енергії в системі електропостачання й виникають суттєві нелінійні спотворення форми напруги, що погіршує умови роботи інших споживачів.

На сьогоднішній день практично відсутні пристрої для контролю параметрів енергоспоживання та показників якості (ПЯ) електричної енергії у мережах низької напруги, переважно через те, що вони найчастіше проектується на більш високу напругу з метою встановлення на вводах підприємства та на лініях підключення субабонентів. При цьому нелінійні спотворення на високій стороні переважно перебувають у межах припустимих стандартами значень.

Результати досліджень останніх десятиліть підтверджують ефективність застосування в якості базису для обліку енергоспоживання й показників якості електричної енергії у мережах низької напруги сучасних теорій потужності. Їх використання дозволяє враховувати вплив змінних складових часових залежностей потужності, отримуючи адекватні результати у разі різних рівнів нелінійних спотворень і несиметрії. Це є основою компенсації знакозмінних складових потужності та надає можливість знизити, у тому числі, вплив нелінійних споживачів з динамічним характером навантаження, забезпечуючи електромагнітну сумісність і потрібну якість електричної енергії у мережах низької напруги.

Питаннями дослідження якості та компенсації неякісностей електричної енергії присвячені роботи видатних українських та закордонних вчених А. К. Шидловського, А. Ф. Жаркіна, І. В. Жежеленка, Г. Г. Жемерова, В. Ю. Тонкаля, С. П. Денисюка, В. М. Михальського, О. Г. Гриба, І. Ф. Домніна, Д. В. Тугая, В. П. Розена, Д. Й. Родькіна, О. П. Чорного, Н. Kim, F. Vlaabjerg, J. Choi, V. Vak-Jensen, H. Akagi та інших провідних спеціалістів у галузі електроенергетики, перетворювальної техніки та електротехнічних комплексів і систем.

Таким чином, *актуальним* науковим завданням є удосконалення існуючих та розробка нових методів і засобів визначення складових змінної у часі потужності, що надає можливість уточнення складових споживаної електричної енергії, визначення її дійсних показників якості та впровадження ефективних заходів щодо компенсації несиметрії та несинусоїдальності в електричних мережах низької напруги.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи становлять результати досліджень, проведених автором протягом 2003–2020 років.

Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема, п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та направленості темати-

ки науково-дослідних робіт кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Матеріали роботи використані при виконанні бюджетних НДР Міністерства освіти і науки України: «Розробка теорії енергопроцесів та систем інтелектуального захисту електричних приводів технологічних механізмів» (№ДР 0104U007032, 2004-2006); «Функціональний взаємозв'язок масогабаритних та енергетичних параметрів електричних машин, апаратів і трансформаторів» (№ДР 0111U001897, 2011-2013); «Діагностика електричних машин у процесі їх виробництва та експлуатації» (№ДР 0114U002630, 2014-2015), у яких автор була співвиконавцем.

**Мета і завдання дослідження** полягає у розробці і науковому обґрунтуванні системи автоматизованого контролю енергоспоживання та оцінки показників якості електричної енергії з використанням складових миттєвої потужності, як сукупності методів й засобів, придатних для визначення енергетичних параметрів й аналізу енергетичних процесів в електричних розподільних мережах низької напруги.

*Для досягнення мети були поставлені та розв'язані такі завдання:*

- аналіз показників якості електричної енергії у мережах з напругою 0,4 кВ промислових і комунальних підприємств регіону;
- обґрунтування впливу різних видів нелінійних споживачів електричної енергії на стан мережі 0,4 кВ;
- розроблення методу контролю енергоспоживання й показників якості електричної енергії на основі складових миттєвої потужності, споживаної з мережі, та вимірювальних модулів на його основі;
- розроблення математичного, включно з точними алгоритмами обробки параметрів, і прикладного програмного забезпечення для вимірювальних модулів;
- дослідження особливостей формування складових миттєвої потужності при зміні коефіцієнта нелінійних спотворень і характеру навантаження, а також способів урахування реактивної потужності у порівнянні з існуючими;
- обґрунтування способів компенсації неякості електричної енергії у внутрішніх мережах електроспоживання в умовах промислових підприємств;
- розроблення підходів щодо технічного обліку електричної енергії у розподільних мережах низької напруги з урахуванням умов реального енергоспоживання;
- апробація розробленої системи автоматизованого контролю енергоспоживання та оцінки показників якості електричної енергії у промислових умовах та проведення технологічних досліджень.

*Об'єктом дослідження є енергетичні процеси у розподільних мережах низької напруги промислових і комунальних підприємств за умови впливу на якість електричної енергії асиметричних та нелінійних навантажень.*

*Предметом дослідження є розроблення методу та пристроїв контролю електроспоживання та визначення показників якості електричної енергії у мережах низької напруги у разі допустимих на практиці змін виду й характеру їх навантаження та обґрунтування ефективних способів компенсації досліджуваних показників неякості електричної енергії.*

**Методи дослідження:** аналізування літературних та патентних джерел при обґрунтуванні шляхів удосконалення методів визначення енергоспоживання та показників якості електричної енергії; теоретичне узагальнення раніше виконаних дослі-

джені при обґрунтуванні методів визначення складових миттєвої потужності, показників якості електричної енергії, підходів щодо компенсації її неякісностей; теоретичні основи електротехніки при розрахунках електричних та енергетичних параметрів у лінійних та нелінійних електричних колах; теорії миттєвої потужності при розробці узагальнених розрахункових співвідношень для визначення її складових; моделювання електричних нелінійних кіл при дослідженні ефективності компенсації нелінійних спотворень та несиметрії; теорія похибок та вимірювань при організації комп'ютерних вимірювань та обґрунтуванні структури вимірювальних модулів системи; методи техніко-економічного аналізу при розробці підходів щодо фінансово-економічної оцінки енергетичних процесів у розподільних мережах електропостачання; перевірка достовірності основних теоретичних висновків та аналітичних розрахунків шляхом експериментальних досліджень та дослідної апробації в промисловості у ході впровадження результатів дисертаційної роботи.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у подальшому розвитку принципів побудови систем контролю енергоспоживання й показників якості електричної енергії за наявності в мережі низької напруги некомпенсованих нелінійних споживачів, а також в обґрунтуванні способів і засобів компенсації їх впливу на живильну мережу.

У роботі отримані наступні **наукові результати**:

- отримав подальший розвиток метод аналізу енергетичних процесів в електричних розподільних мережах 0,4 кВ, що полягає у зміні розрахункових співвідношень за умови понаднормового впливу на якість електричної енергії асиметричних та нелінійних споживачів, який відрізняється застосуванням положень теорії миттєвої потужності, що дозволяє підвищити точність оцінювання основних складових електроспоживання;

- отримав подальший розвиток метод визначення складових миттєвої потужності, що полягає у розробці узагальнених розрахункових співвідношень, який відрізняється найбільшою раціональністю з позицій швидкодії, точності й інформативності обчислень та дозволяє окремо оцінювати внесок кожної із складових миттєвої потужності у процес її формування, що надає можливість визначити й достовірно інтерпретувати параметри електроспоживання в умовах наявності нелінійних спотворень та несиметрії у живильній розподільній мережі;

- отримали подальший розвиток методи оцінювання якості електричної енергії, що полягають в уточненні існуючих та введенні додаткових показників якості, які відрізняються врахуванням отриманих особливостей формування складових миттєвої потужності та дозволяють оцінювати наявність та вплив нелінійних споживачів при зміні коефіцієнта нелінійних спотворень і характеру навантаження;

- удосконалене розрахункове співвідношення для визначення потужності спотворення за умови несинусоїдальності напруг та струмів, яке відрізняється її визначенням через полігармонічну повну та сумарні активну й реактивну потужності, що обумовило доцільність та ефективність її урахування при фінансово-економічній оцінці енергетичних процесів у розподільних мережах електропостачання;

- удосконалено спосіб компенсації впливу нелінійних споживачів в електричних розподільних мережах низької напруги, що полягає у спільному використанні модифікованих розрахункових співвідношень, отриманих на базі р-q-r- теорії потужності із додатковою функцією ідентифікації джерел генерації неякісностей, який відрізняють-

ся безпосереднім використанням ортогональних складових гармонік фазних напруг та струмів у складових ортогональних  $p$ - $q$ - $r$ -векторів та використанням матричного способу представлення складових миттєвої потужності, що дозволяє розробляти та впроваджувати дієві засоби компенсації в умовах мереж низької напруги промислових та комунальних підприємств.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих припущень і підтверджується збігом результатів теоретичних розрахунків, математичного моделювання та експериментальних досліджень.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблено алгоритм та практичні інженерні методики визначення складових миттєвої потужності у трифазних колах змінного струму та показників якості електричної енергії на їх основі;

- на базі обґрунтованої структури розроблено комп'ютеризовану систему контролю енергоспоживання і якості електричної енергії, включно з прикладним програмним забезпеченням, яка дозволяє у режимі реального часу досліджувати енергетичні процеси у розподільних мережах низької напруги;

- обґрунтовано підходи та рекомендації щодо компенсації нелінійних спотворень на основі  $p$ - $q$ - $r$ -теорії потужності, модифікованої відповідно до досліджуваного виду навантаження у мережі;

- отримано розрахункові співвідношення, що дозволяють вводити додаткову оплату електричної енергії для окремих споживачів залежно від основних складових потужності, яка враховує їх вплив на стан мережі через потужність спотворення;

- обґрунтовано впровадження отриманих результатів та технічних рішень в умовах автоматичної системи технічного обліку електричної енергії підприємства, що надає можливість систематизації навантажень та виявлення пристроїв генерації неякісностей до електричних мереж низької напруги;

- виготовлено та експериментально випробувано дослідні зразки бюджетних версій мікроконтролерних модулів контролю енергоспоживання та якості електричної енергії.

Результати роботи впроваджено в умовах ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» у виді алгоритмів визначення складових миттєвої потужності й показників якості електричної енергії та методики ідентифікації джерел спотворень струмів та напруг у трифазних електричних колах та у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при підготовці магістрів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при викладанні дисципліни «Контроль та керування якістю електричної енергії». Впровадження підтверджується відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Автор самостійно сформулювала мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, виконала теоретичну частину роботи, брала безпосередню участь у розробці випробувального обладнання та проведенні експериментальних досліджень.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві: [1], [15] – апробований алгоритм відновлення складових миттєвої потужності на основі отриманих аналітичних залежностей загального виду для струму й напруги та підтверджена його більш висока точність і та інформативність; [2] – підтверджена ефек-

тивність представлення енергетичних процесів у нелінійних колах у функції миттєвих значень; [3] – розроблення математичної моделі, результати обчислень, підтвердження ефективності використання положень модифікованої р-q-r-теорії при оцінці енергетичних параметрів і якості електричної енергії у низьковольтних промислових мережах; [4, 9, 10, 14–17, 19–21, 23–24, 26–28] – основні отримані результати та висновки; [5] – практично обґрунтовано підходи до ідентифікації впливу окремих споживачів за результатами матричного аналізу складових миттєвої потужності; [6] – результати експериментальних досліджень та висновки; [7] – дослідження ефективності використання різних способів визначення й представлення складових миттєвої потужності у сучасних методиках контролю енергоспоживання й компенсації; [8] – залежності загального вигляду для розрахунку квадратурних складових миттєвої потужності для основних видів спектрів вихідних сигналів миттєвих напруги та струму та результати їх аналізу на предмет визначення найбільш вагомих складових та ступеню їх впливу; [12] – доведена помилковість оцінки неякості перетворення енергії у формі потужності спотворення як добутку діючих значень гармонік напруги і струму різних частот та обґрунтований спосіб урахування цього при фінансово-економічній оцінці енергетичних процесів у мережах електропостачання; [13] – проведена оцінка ефективності застосування розроблених методів аналізу та представлення миттєвої потужності для відслідковування проявів несинусоїдальності та несиметрії та при пошуку місця локалізації джерел генерування неякостей у мережах низької напруги; [22] – результати розрахунку складових миттєвих величин напруги, струму і потужності; [29] – спосіб визначення коефіцієнтів використання активної потужності та реактивності для окремих фаз та трифазної мережі у цілому.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й були схвалені на наступних наукових конференціях: XII International symposium on electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering (Spain, Baiona, 2005); Sympozjum Srodowiskowe PTZE “Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce” (Poland, 2006, 2007); 3rd Symposium on Applied Electromagnetics – SAEM (Ptuj, Slovenia, 2010); Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2005, 2006, 2008, 2009, 2013, 2014, 2017); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів» (м. Кременчук, 2004, 2006); I відкрита науково-технічна конференція молодих фахівців (м. Кременчук, 2007); Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (Кременчук, 2010); Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електромеханічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2013); Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, ПСЕ’2010, ПСЕ’2016); International Conference «Modern electrical and energy systems» (Kremenchuk, MEES’2019).

Крім зазначених науково-технічних конференцій, з 2003 до 2020 результати дисертаційної роботи представлялись й обговорювались на науковому семінарі «Електромеханіка, проблеми енергоперетворення та енергоресурсозбереження» Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики».

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано 29 друкованих праць, із них 4 статті у закордонних виданнях, занесених до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science); одна праця міжнародної науково-технічної конференції, занесена до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; одна стаття у науковому виданні України, занесеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; одна стаття у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію; 5 статей у фахових наукових журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services» з яких одна одноосібна; 16 тез доповідей на конференціях з яких одні входять до науково-метричних баз даних «Web of Science» та «Scopus»; отримано один деклараційний патент України.

**Структура та обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації складає 201 сторінку друкованого тексту та містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Основна частина роботи викладена на 159 сторінках. Список використаних джерел складається зі 132 найменувань на 14 сторінках. Дисертація містить 39 рисунків і 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрита актуальність теми, обґрунтовуються мета і задачі дослідження, викладаються основні положення, що виносяться на захист, наведена загальна характеристика роботи.

У **першому розділі** проаналізовано стан питання щодо особливостей зміни показників якості (ПЯ) електричної енергії (ЕЕ) в електричних мережах різного рівня напруги та перспективних методів їх контролю та визначення споживання ЕЕ в умовах промислових підприємств.

Під порушенням якості ЕЕ у дисертаційній роботі розуміється неприпустиме погіршення будь-якого з нормованих її показників, викликане параметрами окремих споживачів або їх груп при спільній експлуатації. Як правило, якість ЕЕ погіршується практично кожним споживачем, досягаючи при певній їх кількості межового значення, що зазвичай призводить до порушення електромагнітної сумісності різних груп і окремих споживачів.

Значна частина споживачів у мережах низької напруги (НН) у процесі роботи генерує до мережі вищі гармоніки, що певним чином погіршує ситуацію з якістю ЕЕ. Процес спотворення форми напруги у мережах НН 0,4кВ має свої особливості і обумовлений, у тому числі, впливом динамічного нелінійного навантаження, найчастіше від працюючих електромеханічних перетворювачів, що включають до свого складу електричну машину і силову частину керованого перетворювача. У цьому випадку рівень спотворень напруги може суттєво перевищувати значення, регламентовані чинними нормативними документами (ДСТУ EN 50160:2014, IEEE Std 519™-2014) – 8% для усталеного режиму і 12% короткочасно та досягати підчас 25-30%. Раніше проведені дослідження показали, що у таких мережах несинусоїдальність напруг і струмів викликає 40% від загального обсягу втрат, а несиметрія – до 20%, що робить актуальним завдання їх точного визначення і компенсації.

Таким чином, в умовах насиченості мереж НН нелінійними споживачами домі-



нуючим фактором погіршення ЯЕ стає несинусоїдальність струмів, а у цілому ряді випадків і напруги живлення на фоні досить високого рівня їх несиметрії.

На даний час ринок систем контролю електричної енергії заснований на використанні засобів автоматизованих систем комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ). Їх впровадженням, у першу чергу, переслідується мета комерційного обліку, контролю і оплати між учасниками оптового ринку енергоресурсів. АСКОЕ характеризуються регламентованою схемою енергообліку і являють собою метрологічно атестовані системи, зміна структури яких практично неможлива без узгодження з енергопостачальною організацією. При цьому на рівні АСКОЕ не забезпечується вирішення питань зниження енергоспоживання у цілому, оскільки це питання знаходиться в компетенції енергетичних служб підприємств, цехів, дільниць тощо і для його вирішення необхідна оцінка енергетичного стану внутрішніх мереж споживачів. Для цього необхідно розробити методологію та відповідні технічні засоби контролю споживання електричної енергії та визначення показників її якості на основних ділянках мереж НН.

У результаті проведеного аналізу були остаточно сформовані мета і задачі досліджень.

**Другий розділ** присвячено аналізуванню існуючих методів та засобів контролю електроспоживання та визначення показників якості електричної енергії в умовах мереж НН промислових та комунальних об'єктів.

Особливістю розрахунків енергетичних процесів у разі несинусоїдальних напруг та струмів в умовах нелінійного несиметричного навантаження є неможливість безпосереднього використання теорії та методів, застосованих під час їх синусоїдної зміни.

Це можна пояснити відсутністю вірної інтерпретації відхилення миттєвої напруги  $u(t)$ , струму  $i(t)$  і потужності  $p(t)$  від синусоїдної форми, а також порушенням в даному випадку основних енергетичних співвідношень для інтегральних складових потужності. При цьому баланс потужностей у загальному випадку також не виконується. Він може бути досягнутий тільки за умови повної синусоїдності напруги або струму поряд з лінійністю навантаження, так як у разі полігармонічної зміни одного з параметрів  $\nu_U$ ,  $\nu_I$  добутки комбінаційних частот миттєвих напруги  $u(t)$  і струму  $i(t)$  дають нульовий інтеграл:

$$\int_0^T \sin(\nu_U \omega t + \psi_U) \sin(\nu_I \omega t + \psi_I) dt = 0, \\ \nu_U \neq \nu_I$$

де  $\omega$  – кутова частота першої гармоніки;  $\nu_U$  і  $\nu_I$  – номери гармонік;  $\psi_U$  и  $\psi_I$  – відповідно їх початкові фазові зсуви;  $T$  – період зміни сигналів.

Так як дійсне навантаження промислових мереж НН є різкозмінним, як внаслідок змінної кількості одночасно працюючих пристроїв, так і через динамічні зміни режимів роботи окремих споживачів, і майже завжди нелінійним, баланс потужностей в інтегральній постановці завдання взагалі позбавлений фізичного сенсу і характеризується іноді абсолютно різними значеннями у разі зміни гармонічного складу напруги живлення і характеру навантаження.

Зазначене є основою для перегляду підходів до визначення складових потужності в мережах НН. Для вирішення поставлених питань обґрунтовано застосування методу гармонічних складових, широко використовуваного при розрахунках електричних кіл з несинусоїдальним живленням. Так як електрична енергія  $W$  фактично являє собою генеровану або споживану у певні проміжки часу потужність  $P$  по

$$W = Pt = \frac{t}{T} \int_0^t p(t) dt,$$

усі подальші результати та висновки відносяться саме до потужності та її складових.

Відповідно до положень класичної теорії, активна потужність у несинусоїдальному режимі є сумою активних потужностей кожної з гармонік

$$P = \sum_v U_v I_v \cos \varphi_v, \quad (1)$$

де  $U_v$  та  $I_v$  – діючі значення напруги і струму  $v$ -ї гармоніки;  $\varphi_v$  – кут зсуву фаз між ними.

Реактивну потужність при цьому визначають аналогічно, як алгебраїчну суму реактивних потужностей, утворених окремо кожною гармонікою

$$Q = \sum_v U_v I_v \sin \varphi_v, \quad (2)$$

а повна, у свою чергу, визначається як добуток діючих значень несинусоїдальних напруги і струму у колі

$$S = UI. \quad (3)$$

Одним з перспективних напрямків вирішення даної проблеми є використання у засобах контролю електроенергії підходів сучасних теорій, заснованих на аналізі складових миттєвої потужності, таких як крос-векторна теорія,  $p$ - $q$  теорія і  $p$ - $q$ - $r$  теорія. При цьому вибір теоретичного базису залежить від цілей, які ставляться при вирішенні задачі. У даному випадку обмеженням на застосування теорій миттєвої потужності є їх адекватність при високому рівні несинусоїдальності і несиметрії напруги, а також можливість компенсації неактивних складових миттєвої потужності, що може бути практично реалізована при використанні сучасних технічних і програмних засобів.

Як показники якості електричної енергії, у розрізі поставленої задачі використовуються коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму

$$THD_{X_i} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} X_{(v)i}^2}}{X_{(1)i}} \cdot 100,$$

де  $X_{(1)i}$  – діюче значення лінійної (фазної) напруги або струму основної частоти для  $i$ -го спостереження, коефіцієнти несиметрії напруги та струму за зворотною та нульовою послідовністю, що визначаються відповідно до чинних національних стандартів як

$$\varepsilon_{2X_i} = \frac{X_{2(I)i}}{X_{1(I)i}} \cdot 100; \quad \varepsilon_{0X_i} = \frac{X_{0(I)i}}{X_{ном.ф}} \cdot 100,$$

де  $X_{2(I)i}$ ,  $X_{0(I)i}$  – діючі значення напруг або струмів відповідно зворотної та нульової послідовностей основної частоти трифазної системи в  $i$ -му спостереженні;  $X_{1(I)i}$  – ді-

юче значення напруги або струму прямої послідовності основної частоти в  $i$ -му спостереженні;  $X_{ном.ф}$  – номінальне значення фазної напруги або струму, та ряд додаткових коефіцієнтів, що характеризують енергообмінні процеси у розглянутих мережах.

Основою для вдосконалення розрахункових та вимірювальних методів є виконання безпосередніх дій з сигналом потужності  $p(t)$  у часовій області. Це обумовлює обрання основою теоретичних досліджень безпосередніх вимірювань миттєвих параметрів струму та напруги.

З існуючих систем визначення електроспоживання та показників якості електричної енергії для розв'язання поставлених задач придатні лише комп'ютерні засоби вимірювання, засновані на використанні сертифікованих модулів аналогово-цифрового вводу-виводу інформації та високоточних датчиків контрольованих величин, спроектовані під конкретні типи лабораторних та промислових досліджень та їх низьковартісні мікроконтролерні аналоги для випадку розподільних вимірювальних систем.

**У третьому розділі** викладені основні результати теоретичних досліджень.

Засобами математичного моделювання було досліджено величину похибки, що виникає у разі застосування класичних підходів. Отримані результати відповідають випадку однофазної мережі, що є припустимим, так як, внаслідок різного завантаження й неякісності енергії по фазах, розрахунки мають проводитися для кожної фази окремо.

На підставі результатів розрахунків можна стверджувати, що різниця між значеннями повної потужності, що розраховується на основі (3) з визначенням повної потужності через її активну  $P$  й реактивну  $Q$  складові

$$S^* = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

у разі синусоїдної напруги живлення за умови несинусоїдальності струму навантаження досягає (для значення коефіцієнта нелінійних спотворень 25-30 %) величини 8,5-9 %.

На рис. 1–2 представлені залежності зміни похибки вимірювання активної  $\Delta P$  і реактивної  $\Delta Q$  потужності при зміні коефіцієнта нелінійних спотворень  $THD_{Ui}$ , розрахованого відповідно до чинних стандартів та рекомендацій, і фазового кута  $\varphi$  між напругою й струмом. Реактивна й активна потужності розраховувалися за класичними співвідношеннями при використанні методу еквівалентних синусоїд і порівнювалися зі значеннями, отриманими зі співвідношень (1)–(2) через окремі гармонічні складові  $Q_i, P_i$ , за умови зміни кута зсуву фаз між напругою й струмом від  $-90$  до  $+90$  градусів, що відповідає припустимому характеру навантаження.

Як видно з рис. 1–2, відносна похибка вимірювання  $\Delta P$  і  $\Delta Q$ , крім  $THD_{Ui}$ , суттєво залежить від кута навантаження  $\varphi$ , що приводить до неоднозначності інтерпретації результатів та змінює свій знак для різних значень  $THD_{Ui}$ , що дозволяє визначити припустимі умови застосування класичних співвідношень. У той же час, максимальна похибка визначення реактивної потужності спостерігається при малих кутах навантаження від 0 до 20 градусів, тобто в основних режимах роботи споживачів.

Доведено, що інформативним підходом у процесі оцінювання стану трифазної системи є аналіз миттєвої потужності. Як видно з результатів моделювання, наведених на рис. 3, графік зміни сумарної миттєвої потужності по фазах є пряма лінія тільки у разі симетричних і синусоїдних фазних  $u(t)$  та  $i(t)$ , що відповідає споживачу

ванню від мережі тільки активної потужності. За наявності несиметрії і нелінійних спотворень в ньому з'являються періодичні гармонійні і полігармонічні складові, які значно збільшуються при їх спільному прояві.

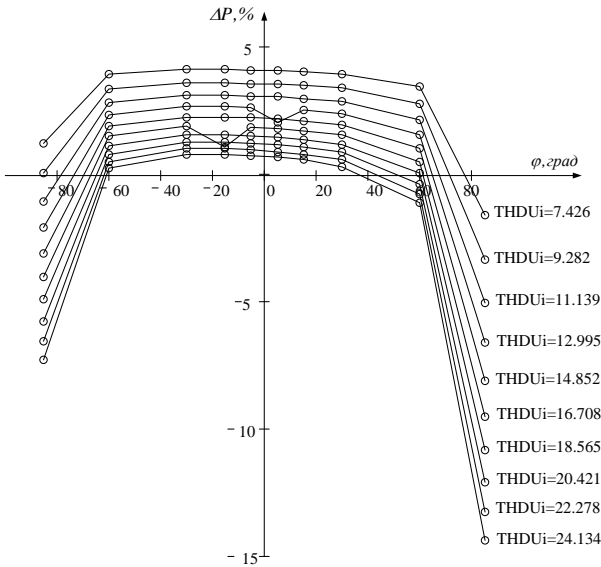


Рисунок 1 – Залежності  $\Delta P = f(\varphi)$

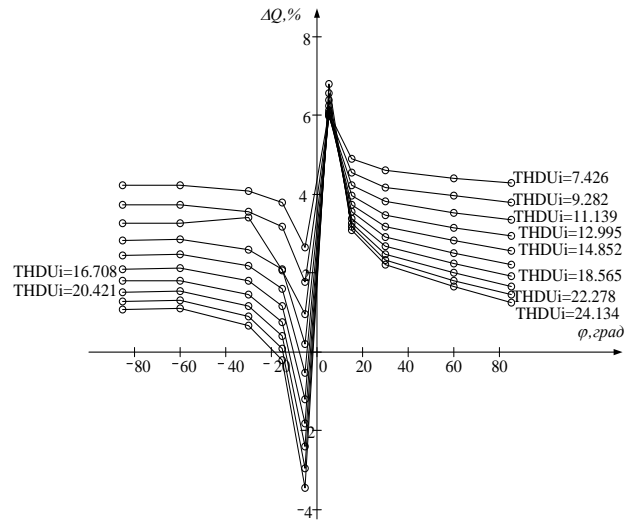


Рисунок 2 – Залежності  $\Delta Q = f(\varphi)$

Зазначене є основою для перегляду підходів до визначення й подання параметрів енергопроцесів і ПЯЕ у мережах НН. Крім цього, класична методика розрахунків не дає можливості реально визначити й компенсувати виникаючі неякості в розподільних мережах НН.

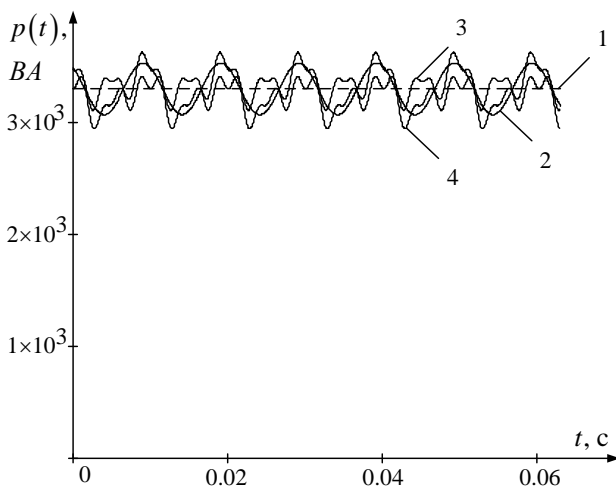


Рисунок 3 – Графіки зміни сумарної по фазах  $p(t)$ : 1 – симетричні і синусоїдальні  $u(t)$  та  $i(t)$ ; 2 – наявність несиметрії фазних напруг; 3 – наявність несинусоїдальності фазних струмів; 4 – спільний прояв несиметрії і несинусоїдальності

струмів  $i(t)$ , представлених у вигляді суми квадратур відповідних сигналів:

$$u(t) = \sum_{v=1}^{(N-1)/2} (a_{uv} \cos(v\omega t) + b_{uv} \sin(v\omega t)); i(t) = \sum_{v=1}^{(N-1)/2} (a_{iv} \cos(v\omega t) + b_{iv} \sin(v\omega t)),$$

Згідно з поставленими задачами, слід виділити дві області застосування обумовлених у другому розділі методів аналізу гармонічних складових – енергооблік і компенсація досліджуваних видів неякостей. У першому випадку завдання полягає у зниженні похибки визначення складових потужності і пов'язаних з ними енергетичних параметрів, а у другому – у виділенні компенсованих складових.

Доведено, що найбільш інформативним є підхід, що передбачає визначення складових  $p(t)$  кожної фази як результат перемноження рядів фазних напруг  $u(t)$  та

$$\text{де } a_{xv} = \frac{2}{N} \sum_n X_n \sin(v\omega t_n); \quad b_{xv} = \frac{2}{N} \sum_n X_n \cos(v\omega t_n).$$

Тут  $N$  – число точок відліку для вимірюваного сигналу за період основної гармоніки;  $a_{xv}, b_{xv}$  – квадратурні складові сигналів напруги або струму;  $X_n$  – значення вимірюваних сигналів напруги або струму в точках дискретизації.

При цьому алгоритм визначення складових миттєвої потужності зводиться до процедур виділення необхідних складових гармонік потужності та їх обчислення на основі розрахункових співвідношень із квадратур, що формують їх гармоніки напруги і струму.

$$p(t)|_{const} = \sum_{v=1,3,\dots}^n P_v; \quad (4)$$

$$p(t)|_{cos} = \sum_{v=1,3,\dots}^n (P'_v + \sum_{\substack{j=1,3,\dots,n \\ k=n,n-2,\dots,1 \\ j+k=2\cdot v \\ j \neq k}} P'_{jk} + \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ l-m=2\cdot v \\ m-l=2\cdot v \\ l \neq m}} P_{lm}) \cdot \cos(2v\omega t) + \quad (5)$$

$$+ \sum_{v_x=1,3,\dots}^n \left( \sum_{\substack{v_y=3,5,\dots \\ v_y > v_x \\ v_x + v_y \neq 2\cdot v}}^n \left( \sum_{\substack{j=1,3,\dots,n \\ k=n,n-2,\dots,1 \\ j+k=v_x+v_y \\ j \neq k}} P'_{jk} + \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ l-m=v_x+v_y \\ m-l=v_x+v_y \\ l \neq m}} P_{lm} \right) \cdot \cos((v_x + v_y)\omega t) \right);$$

$$p(t)|_{sin} = \sum_{v=1,3,\dots}^n (Q'_v + \sum_{\substack{j=1,3,\dots,n \\ k=n,n-2,\dots,1 \\ j+k=2\cdot v \\ j \neq k}} Q'_{jk} - \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ m-l=2\cdot v \\ l \neq m}} Q_{lm} + \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ l-m=2\cdot v \\ l \neq m}} Q_{lm}) \cdot \sin(2v\omega t) + \quad (6)$$

$$+ \sum_{v_x=1,3,\dots}^n \left( \sum_{\substack{v_y=3,5,\dots \\ v_y > v_x \\ v_x + v_y \neq 2\cdot v}}^n \left( \sum_{\substack{j=1,3,\dots,n \\ k=n,n-2,\dots,1 \\ j+k=v_x+v_y \\ j \neq k}} Q'_{jk} - \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ m-l=v_x+v_y \\ l \neq m}} Q_{lm} + \sum_{\substack{l=1,3,\dots,n \\ m=n,n-2,\dots,1 \\ l-m=v_x+v_y \\ l \neq m}} Q_{lm} \right) \cdot \sin((v_x + v_y)\omega t) \right)'$$

Для більш наочного контролю покомпонентного формування сигналу миттєвої потужності було досліджене використання матричних форм представлення сигналів потужності та струму і напруги, які її формують.

При цьому розрахункові співвідношення представляються у вигляді тензорного добутку:

$$P = U \otimes I^T, \quad (7)$$

де  $U, I^T, P$  – відповідно матриця-стовпець напруги, транспонована матриця-стовпець (матриця-рядок) струму і матриця потужності.

На головній діагоналі матриці потужності розташовуються добутки одночастотних компонент, а всі інші можливі комбінації знаходяться на своїх місцях, що відповідають номерам гармонік напруги для стовпця та гармонікам струму для рядка.

З наведених співвідношень визначаються шукані величини складових миттєвої потужності. На їх основі отримані уточнені розрахункові співвідношення для досліджуваних складових енергоспоживання і показників якості електроенергії, що до-

звояють визначати гармоніки миттєвих струму  $I_v$ , напруги  $U_v$  та потужності  $P_v$ , активну  $P$  та реактивну  $Q$  потужності, коефіцієнти несиметрії за зворотною  $\varepsilon_U$  та нульовою  $\varepsilon_{U_0}$  послідовностями, коефіцієнти нелінійних спотворень  $THD_X$  напруги та струму та енергетичні коефіцієнти, що враховують досліджувані зміни якості електричної енергії.

У результаті порівняльного оцінювання було обґрунтовано розрахункове співвідношення для визначення потужності спотворення виду

$$T_{cn} = \sqrt{S^2 - (P_\Sigma)^2 - (Q_\Sigma)^2}.$$

де  $P_\Sigma, Q_\Sigma$  – сумарні активна та реактивна потужності за всіма враховуваними гармоніками. Воно дозволяє повною мірою оцінювати спотворення у досліджуваних мережах та сформовано вартісні функції, за допомогою яких можна реалізувати механізм введення штрафних санкцій за порушення якості електричної енергії у мережах НН.

Перша функція при синусоїдній зміні параметрів має вид

$$C_E = T_p \varepsilon P \sqrt{1 + tg^2 \varphi} \xi,$$

де  $C_E$  – сума оплати за користування електроенергією;  $T_p$  – час роботи;  $\varepsilon$  – коефіцієнт, враховуючий тариф умови оплати;  $\xi = 1/3$  – за умови відсутності спотворень.

Наявність спотворень враховується у наступний спосіб

$$C_E = T_p \varepsilon P_\Sigma \sqrt{1 + tg^2 \varphi_1 \xi_1 \left( (P_1)^2 / (P_\Sigma)^2 \right) + tg^2 \varphi_2 \xi_2 \left( (P_2)^2 / (P_\Sigma)^2 \right) + \dots + tg^2 \varphi_i \xi_i \left( (P_v)^2 / (P_\Sigma)^2 \right)},$$

де  $P_1 \dots P_v$  – активна потужність першої й  $i$ -ї гармонік;  $P_\Sigma = P_1 + P_2 + \dots + P_v$ ;  $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_v$  – коефіцієнти, що враховують негативний внесок у формування енергетичних процесів у цілому.

Друга функція обумовлює можливість формування оплати електричної енергії для окремих споживачів залежно від трьох основних складових потужності, що визначають енергопроцес – активної, реактивної та потужності спотворення:

$$C_\Sigma = a_1 P_\Sigma + a_2 Q_\Sigma + a_3 T_{cn},$$

де  $a_1, a_2, a_3$  – тарифікаційні коефіцієнти.

Для вирішення задачі компенсації неякісностей було обґрунтовано застосування  $p$ - $q$ - $r$  теорії потужності. До її переваг у розглянутих питаннях слід віднести можливість роздільно контролювати фазні і нульовий струми без необхідності у накопичувачі енергії, виразивши миттєву реактивну потужність у вигляді окремо компенсованих і не пов'язаних лінійно  $q_r$  і  $q_q$  складових за умови можливості урахування спектрального складу миттєвих потужностей. Особливістю її застосування є віднесення змінних складових миттєвої потужності від комбінаційних частот до синусої і косинусної знакоперемінних складових ортогональних компонент  $p$ - $q$ - $r$ -векторів.

Так як у разі компенсації відповідно до  $p$ - $q$ - $r$ -теорії немає необхідності у виділенні синусоїдної складової напруги мережі, з урахуванням особливостей використовуваного математичного забезпечення, був обґрунтований вибір структури силового активного фільтра з керуванням методом завдання потужностей.

Моделювання режимів роботи системи компенсації виконано у пакеті імітаційного моделювання *Matlab PowerSim*. Математична модель побудована за умови жи-

влення змінного нелінійного несиметричного навантаженням від трансформатора малої потужності. В основу обчислювальних алгоритмів покладено співвідношення (4)–(6). Вони, на основі результатів спектрального розкладання струмів і напруг у системі, дозволяють дослідити особливості формування складових миттєвої потужності, корелюючи їх зі зміною використовуваних показників якості електроенергії.

На рис. 4 наведені криві фазних напруг і струмів у трифазній мережі до і після компенсації. Отримані результати підтверджують більш високу ефективність запропонованого способу компенсації для мереж НН в порівнянні з базовим варіантом компенсації згідно  $p-q-r$  теорії.

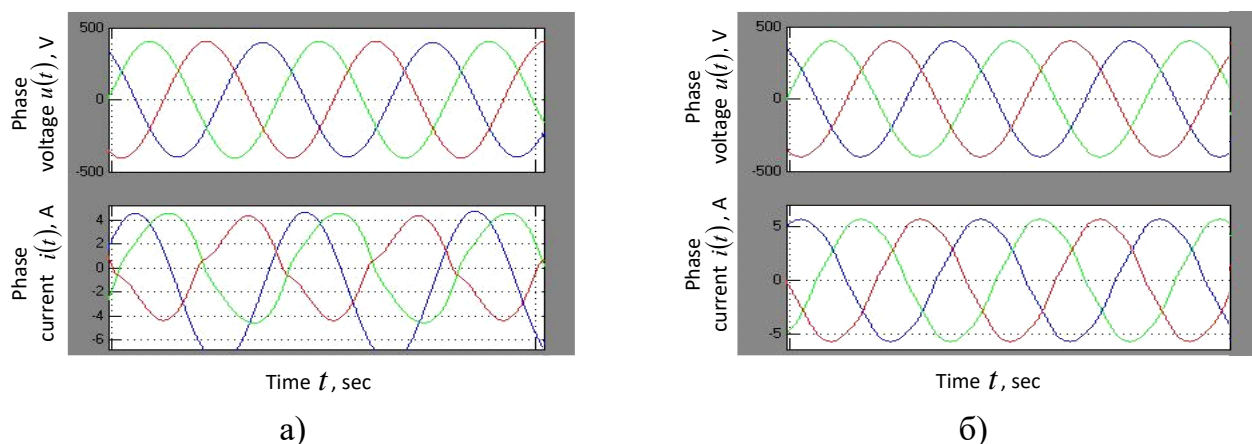


Рисунок 4 – Залежності напруг і струмів в мережі: а) до компенсації; б) після компенсації

**У четвертому розділі** висвітлені питання розроблення комп'ютеризованих вимірювальних засобів та експериментального дослідження складових енергоспоживання та показників якості електричної енергії у лабораторних умовах.

На базі обґрунтованої структури для експериментальних досліджень енергетичних процесів в мережах НН була розроблена комп'ютеризована система контролю енергоспоживання і якості електроенергії, структурна схема якої представлена на рис. 5.

Оснoву системи складає сертифікований зовнішній вимірювальний модуль E14-440 фірми LCard із вбудованим цифровим сигнальним процесором, що дозволяє реалізувати у режимі реального часу передбачені розробленим методом вимірювання і обчислення, включно із спектральним розкладанням. Інформація про енергетичні процеси у трифазній мережі надходить в модуль від трьох датчиків напруги (ДН) і трьох датчиків струму (ДС), сигнал з яких, від датчика струму – безпосередньо, а від датчика напруги – з токового шунта (ТШ) на його виході, надходить на вхід аналогового комутатора (АК), з виходу якого подається на вимірювальний операційний підсилювач (ОП), в колах встановлення нуля і зворотного зв'язку якого використовуються відповідні програмовані опори ПОКВН і ПОКЗЗ. Структура модуля в основному обумовлена можливостями модуля E14-440 і орієнтована на мінімум використання його апаратних ресурсів при простоті розробки програмного забезпечення.

У процесі оцінювання інформативності уточнених показників якості електричної енергії була підтверджена можливість ідентифікації за їх допомогою однофазних і трифазних споживачів, що спотворюють якість енергетичних процесів у низьковольтній мережі 0,4 кВ. Було доведено, що така ідентифікація найбільш ефективна за умови контролю окремих показників у ключових вузлах електричної мережі.

Додаткове дослідження питань точності ідентифікації здійснювалось шляхом

моделювання різних видів неякості, характерних для трифазних розподільних мереж НН, а його результати оцінювались у вигляді розрахункових матриць для сумарної по фазах  $p(t)$ , розраховуваних по (7). Отримані результати підтвердили інформативність використання матричної форми та ефективність визначення у такий спосіб несиметрії однієї з фазних напруг на рівні 5 %, несинусоїдальності однієї з фазних напруг на рівні 12 %, несинусоїдальності одного з фазних струмів на рівні 27 %, а також комбінований та спільний прояв цих умов.

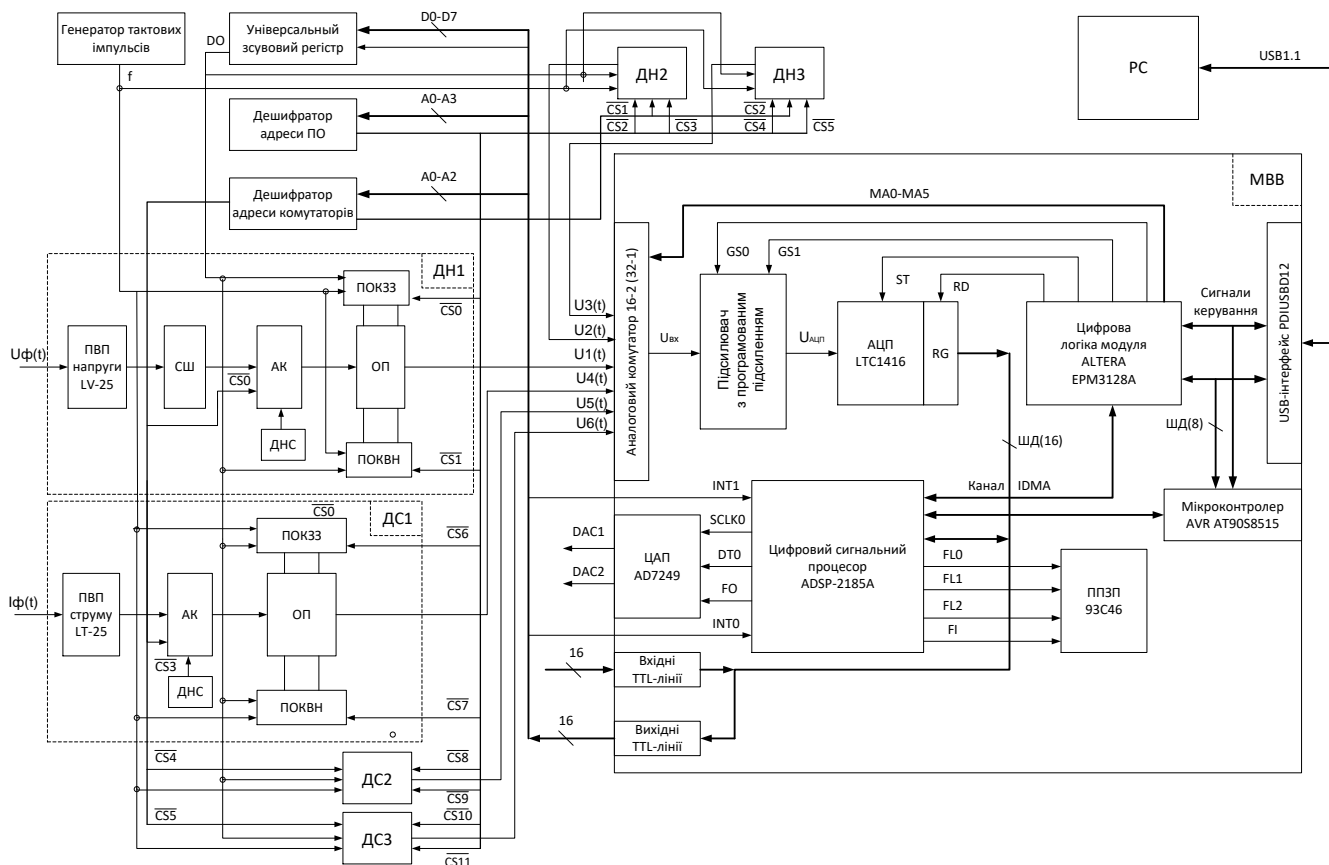


Рисунок 5 – Схема використовуваного вимірювального обладнання на базі модуля LCard E14-440

У результаті було доведено, що запропонований підхід і методи аналізу та подання миттєвої потужності дозволяють достовірно розрізняти досліджувані варіанти. Крім цього, було доведено інформативність аналізу ефективної потужності і використовуваних коефіцієнтів у задачах оцінки досліджуваних видів неякостей.

**П'ятий розділ** присвячено питанням апробації отриманих результатів в умовах виробництва та проведенню промислових випробувань.

Реалізувати можливості розроблених методів та засобів можливо у складі автоматичних систем технічного обліку електроенергії, особливості побудови яких розкрито на рис. 6. У розрізі проблеми, що розглядається, елементи АСТОЕ використовуються для контролю електричної енергії, яка надходить від зовнішніх джерел, виробляється самим споживачем, а також розподіляється і споживається ним.

При цьому отримана у результаті інформація призначена виключно для внутрішнього використання. Технічна реалізація АСТОЕ у даному випадку характеризується великою кількістю точок обліку. Необхідна деталізація енергоспоживання досягається тільки за умови установки вимірювальних пристроїв безпосередньо на спожи-



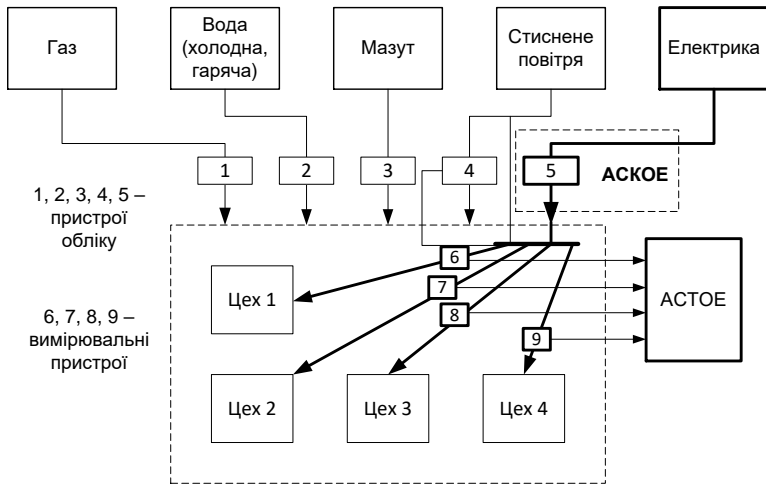


Рисунок 6 – Узагальнена схема обліку паливно-енергетичних ресурсів із застосуванням АСТОЕ окремих споживачів

м. Кременчука, далі по тексту позначених як об'єкти 1–4 відповідно.

З метою дослідження різних режимів навантаження, вимірювання проводилися багаторазово у різний час доби, що дозволяло варіювати кількість і сумарну потужність споживачів, що підключаються, для комунальних об'єктів, а для промислових – додатково враховувати тип і характер споживачів. Первинними вимірюваними параметрами були напруга  $u(t)$  й струм  $i(t)$  по кожній з фаз. Їх форма для однієї з фаз на ділянках мережі об'єктів 1–4 у випадку довільного навантаження показана відповідно на рис. 7, а-г.

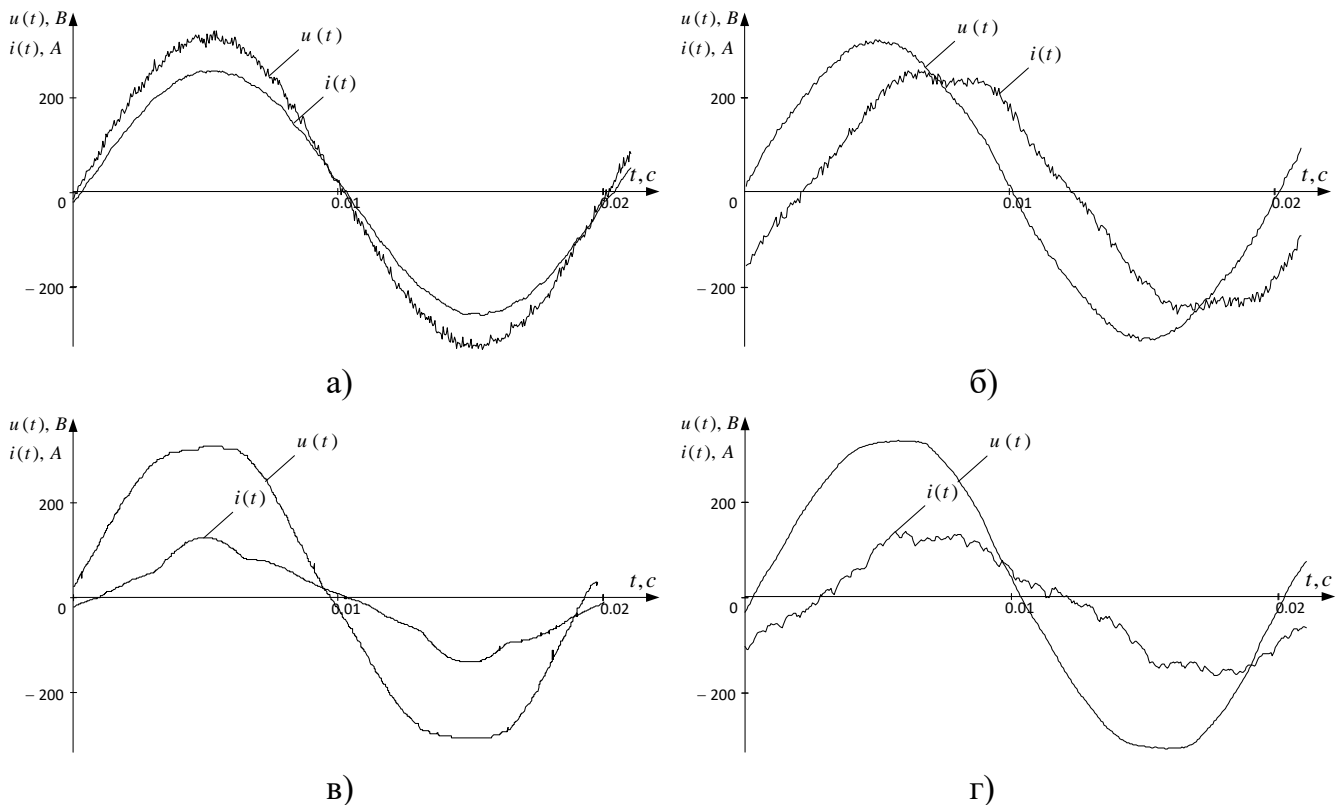


Рисунок 7 – Форма фазних напруг  $u(t)$  і струмів  $i(t)$  досліджуваних об'єктів

вачах (верстати, печі, окремі потужні електричні машини, частотні регульовані електроприводи і т.д.).

У ході експериментальних досліджень були проведені вимірювання споживаної потужності й показників якості електричної енергії у мережах НН 0,4 кВ ПАО «Єристовський ГЗК» (м. Горішні Плавні), ПрАТ «Кременчуцький вагонобудівний завод», Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського й житлового багатоповерхового будинку, що перебуває у власності комунального підприємства

Як видно з наведених залежностей, спотворення форми напруги й струму мають різний характер для промислових і комунальних об'єктів, що проявляється у різному спектральному складі вимірюваних сигналів. Крім цього, для комунальних об'єктів більш характерне нерівномірне завантаження фаз. У результаті узагальнення даних вимірювань отримані діапазони зміни основних показників якості електричної енергії, характерних для розглянутих мереж – коефіцієнтів нелінійних спотворень фазних напруг  $THD_U$  і струмів  $THD_I$ , а також коефіцієнтів несиметрії напруги й струму відповідно по зворотній  $\varepsilon_{U2}$  і  $\varepsilon_{I2}$  й нульовій  $\varepsilon_{U0}$  і  $\varepsilon_{I0}$  послідовностям, що відображене у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальної оцінки ПЯЕ

Показник якості	$THD_U$ , %	$THD_I$ , %	$\varepsilon_{U2}$ , %	$\varepsilon_{I2}$ , %	$\varepsilon_{U0}$ , %	$\varepsilon_{I0}$ , %
Об'єкт 1	7,04 – 9,23	8,12 – 15,4	1,78 – 3,92	3,27 – 5,86	0,86 – 1,77	2,59 – 4,15
Об'єкт 2	5,17 – 17,6	10,7 – 24,8	2,54 – 4,83	4,01 – 7,63	1,23 – 3,09	2,68 – 4,49
Об'єкт 3	3,28 – 15,7	9,74 – 21,7	2,87 – 10,5	4,72 – 13,4	2,46 – 7,23	3,83 – 10,4
Об'єкт 4	3,84 – 11,25	8,33 – 17,4	2,11 – 8,73	3,46 – 11,8	2,28 – 6,14	2,98 – 9,73

Так як для вірної ідентифікації навантажень, що викликають порушення якості електричної енергії необхідний поточний контроль параметрів у розгалуженнях трифазної мережі, для практичного застосування у промисловості та комунальному секторі обґрунтована структура бюджетного вимірювального модуля, представлена на рис. 8.

У рамках основного завдання промисловий вимірювальний модуль забезпечує обчислення і передачу результатів розрахунків для подальшої візуалізації та аналізу на ЕОМ верхнього рівня.

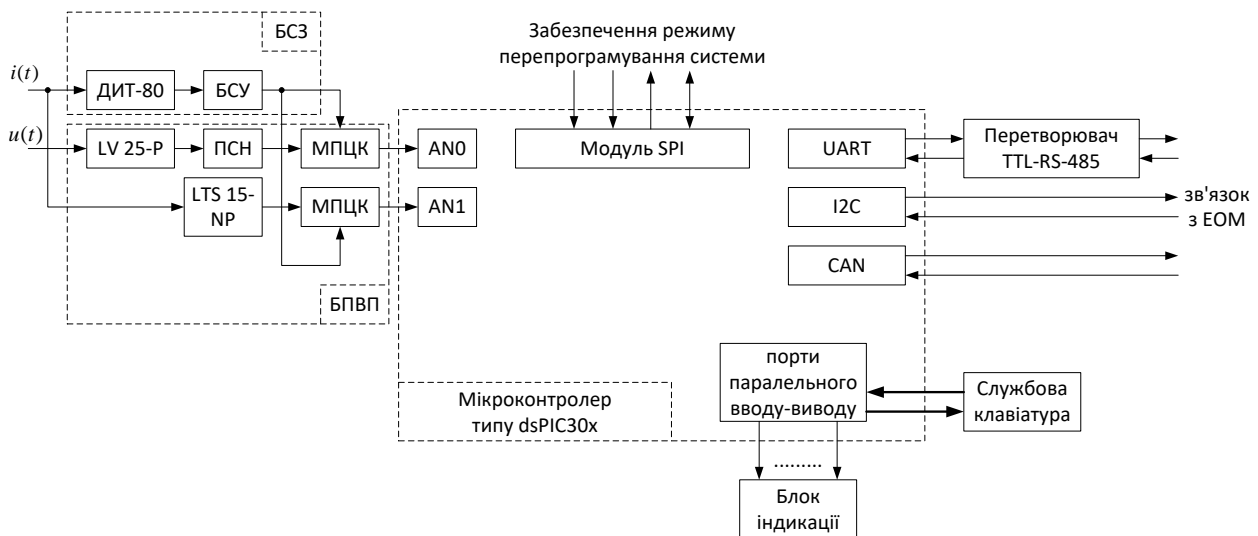


Рисунок 8 – Структура вимірювального модуля на базі мікроконтролера

Враховуючи, що основною його задачею є поточний аналіз за розробленими методами енергетичних параметрів та ПЯЕ, для практичної реалізації модуля достатньо мікроконтролера з мінімальною стандартною апаратною і програмною підтримкою, що зумовило вибір мікроконтролера з цифровим сигнальним процесором dsPIC30F2010 з параметрами: Program (FLASH) – 12 Kbytes; Memory (FLASH) – 4 Kwords; EE – 1024 Bytes; SRAM – 512 Bytes; 10 bit– 6 ch A/D; Output Comp/Std – 2 PWM інтерфейс I<sup>2</sup>C.

Апробація такого модуля у промислових умовах була виконана за фактом звер-

нення енергетичної служби ПАТ «Крюківський вагобудівний завод» з приводу необхідності оцінки якості електричної енергії в електричних мережах 35/6 кВ через

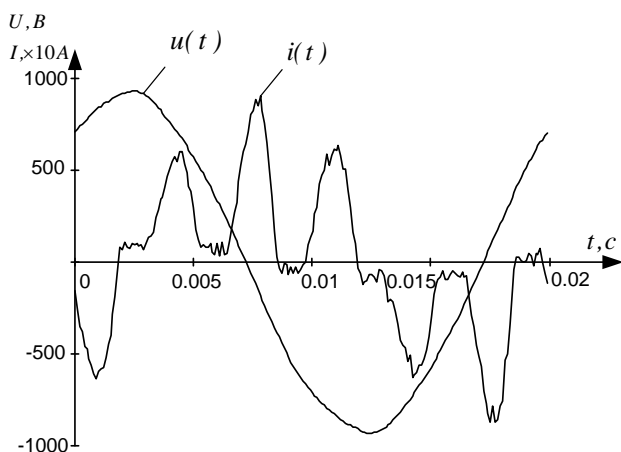


Рисунок 9 – Результати вимірювання миттєвих значень фазних напруг та струмів на комірці 27 ГРУ ТЕЦ ПАТ КВБЗ (залежність для струму збільшена у 10 разів для наочності його оцінки порівняно з напругою)

виникнення суттєвих спотворень струмів на підстанції постачальника, що приводило до хибного спрацьовування пристроїв релейного захисту.

Проведені дослідження дозволили визначити у якості джерела гармонік перетворювачі частоти без фільтруючих дроселів (мережевих фільтрів), підключені до електричної мережі 0,4 кВ субабонента підприємства. Їх робота спричинювало суттєве зростання  $THD_i$ , непомітне через його компенсацію при нормальному завантаженні електричних мереж підприємства, яке спостерігалось на всіх рівнях більш високої напруги при його простоюванні (рис. 9).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних і практичних результатів та їх систематизації розв'язане актуальне наукове завдання вдосконалення існуючих та розробки нових методів і засобів визначення складових змінної у часі потужності, що дозволило уточнити методи розрахунків складових споживаної електричної енергії, визначення її дійсних показників якості та обумовило впровадження ефективних заходів компенсації несиметрії та несинусоїдальності в електричних розподільних мережах низької напруги.

Результати досліджень, проведених за темою дисертаційної роботи, дозволили сформулювати такі висновки.

1. Шляхом порівняльного аналізу похибки визначення складових споживаної електричної енергії за умови зміни коефіцієнта нелінійних спотворень у межах 0–25%, та кута зсуву фаз між напругою й струмом від  $-90$  до  $+90$  градусів, що відповідає припустимому характеру навантаження, доведена незастосовність класичних методів розрахунків енергетичних процесів в електричних розподільних мережах низької напруги через зниження їх точності (похибка визначення активної потужності змінюється у межах 4-15%, а реактивної – 4-6,5%) та інформативності (повна неінформативність кута зсуву фаз та основних інтегральних параметрів вимірюваних сигналів) при понаднормових значеннях нелінійних спотворень. Зазначене підтвердило ефективність представлення енергетичних процесів у нелінійних колах у функції миттєвих значень споживаної потужності та необхідність зміни розрахункових співвідношень при аналізі енергетичних процесів в електричних розподільних мережах 0,4 кВ.

2. Обґрунтоване застосування під час вирішення поставлених задач методу вираження складових миттєвої потужності через ортогональні квадратурні складові

миттєвих струмів і напруг, що дозволило отримати узагальнені розрахункові співвідношення, які відрізняються найбільшою раціональністю з позицій швидкодії (у 1,5-2 рази менший середній об'єм обчислень), точності (середнє зниження похибки на 1,2-6,7%) та високої інформативності обчислень, обумовленої можливістю аналізу окремих складових миттєвої потужності, та надають можливість окремо оцінювати внесок кожної із складових миттєвої потужності у процес її формування. Доведена адекватність і більш висока достовірність отриманих залежностей під час розрахунків складових миттєвої потужності для основних видів можливих спектрів вихідних сигналів миттєвих напруги й струму, порівняно з використанням способом одержання складових миттєвої потужності з її часової залежності шляхом безпосереднього застосування перетворення Фур'є. Це дозволяє визначати й достовірно інтерпретувати параметри електроспоживання в умовах впливу нелінійних спотворень та несиметрії у живильній розподільній мережі.

3. Обґрунтована необхідність перегляду методів визначення параметрів споживаної потужності та показників якості за складовими миттєвої потужності та отримано уточнені розрахункові співвідношення для їх визначення, що дозволяють враховувати характер оцінюваних спотворень. У підсумку це дозволило розвинути існуючі методи оцінювання якості електричної енергії за рахунок врахування отриманих особливостей формування складових миттєвої потужності та дає можливість оцінювати наявність та вплив нелінійних споживачів при зміні коефіцієнта нелінійних спотворень і характеру навантаження. Разом з матричною формою представлення складових миттєвої потужності, такий підхід дозволяє достовірно ідентифікувати несиметрію (від 2-5%) та несинусоїдальність фазних напруг (від 6-12%) і струмів (від 5 %) в умовах перевищення їх припустимих значень, а також їх спільний прояв. За отриманими результатами розроблено алгоритм та практичні інженерні методики визначення складових миттєвої потужності у трифазних колах змінного струму та показників якості електричної енергії на їх основі. На базі обґрунтованої структури розроблено комп'ютеризовану систему контролю енергоспоживання і якості електричної енергії, включно з прикладним програмним забезпеченням, яка дозволяє у режимі реального часу досліджувати енергетичні процеси у розподільних мережах низької напруги.

4. З використанням залежностей для середнього та середньоквадратичного значень споживаної потужності удосконалене розрахункове співвідношення для визначення потужності спотворення за умови несинусоїдальності напруг та струмів, яке відрізняється її визначенням як суми добутків різночастотних складових полігармонічних сигналів струмів та напруг, що дозволяє виключити з розрахунків інші складові нев'язки енергетичного балансу. Зазначене обумовило можливість та доцільність введення нових розрахункових співвідношень, за допомогою яких можна реалізувати механізм введення штрафних санкцій через порушення якості електричної енергії у розподільних мережах низької напруги, що є ефективним засобом фінансово-економічної оцінки спотворень енергетичних процесів. Обґрунтовано впровадження отриманих результатів та технічних рішень в умовах автоматичної системи технічного обліку електричної енергії підприємства, що надає можливість систематизації навантажень та виявлення пристроїв генерації неякісностей до електричних мереж низької напруги.

5. Обґрунтовано підхід щодо компенсації впливу нелінійних споживачів в електричних розподільних мережах низької напруги, що полягає у спільному використанні розрахункових співвідношень, отриманих на базі р-q-r- теорії потужності, які відрізняються безпосереднім використанням ортогональних квадратурних складових гармонік фазних напруг та струмів у складових ортогональних р-q-r-векторів із додатковою функцією ідентифікації джерел генерації неякісностей у разі використання матричного способу представлення складових миттєвої потужності, що дозволяє розробляти рекомендації щодо впровадження дієвих засобів компенсації в умовах мереж низької напруги промислових та комунальних підприємств.

6. Розроблено структуру лабораторного та промислового модулів контролю енергоспоживання та якості електричної енергії, що забезпечують реалізацію алгоритмів автоматизованого визначення складових миттєвої потужності й ПЯ електричної енергії. Обґрунтоване застосування у якості ядра таких вимірювальних модулів сигнального процесора, що забезпечує високу продуктивність і ефективність обчислень необхідних параметрів у режимі реального часу. Виготовлено та експериментально випробувано дослідні зразки бюджетних версій мікроконтролерних модулів контролю енергоспоживання та ПЯ електричної енергії промислового застосування. Виконана систематизація результатів експериментальних досліджень особливостей енергоспоживання типових споживачів промислових і комунальних об'єктів видами та рівнями навантаження дозволила одержати діапазони зміни основних показників якості електричної енергії, які складають для  $THD_U - 3,28-17,6 \%$ , для  $THD_I - 8,12-24,8$ , для  $\varepsilon_{U2} - 1,78-10,5 \%$ , для  $\varepsilon_{I2} - 3,27-13,4 \%$ , для  $\varepsilon_{U0} - 0,86-7,23 \%$ , для  $\varepsilon_{I0} - 2,59-10,4 \%$ , а також розробити механізм поділу впливу окремих груп споживачів на якість електричної енергії у розподільних низьковольтних мережах.

7. Апробація отриманих результатів в умовах виробництва довела ефективність впровадження розроблених методів і засобів контролю енергоспоживання та визначення якості електричної енергії.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

*Статті у закордонних виданнях, занесених до міжнародних наукометричних баз даних*

1. Zagirnyak M.V., Prus V.V., Nikitina A.V. Grounds for efficiency and prospect of the use of instantaneous power components in electric systems diagnostics. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2006. № 12. pp. 123–125 (*Scopus*).

2. Prus V., Nikitina A., Zagirnyak M., Miljavec D. Research of energy processes in circuits containing iron in saturation condition. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011. № 3. P. 149–152 (*Scopus, Thompson Reuters*).

3. Zagirnyak M., Prus V., Nikitina A. Method of low-voltage electric network power processes control and their quality assurance on the basis of p-q-r theory. *Acta Technica*. 2013. Vol. 58, No. 4. pp. 367–380 (*Scopus*).

4. Prus V., Nikitina A. The ways for the improvement of the information value of the methods for the assessment of the quality of electric energy as a part of its technical accounting systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, R. 95 № 5 P. 71–74. (*Scopus*).

*Праці конференцій, занесених до міжнародних наукометричних баз даних*  
*Web of Science™ Core Collection та Scopus*

5. Prus V., Nikitina A. Accounting of Electric Energy Consumption and Quality as a Part of Automatic Systems of Technical Accounting of Energy. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, September 2019*, art. № 8896557, pp. 274-277 (*Scopus*).

*Статті у журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних*

6. Загирняк М. В., Прус В. В., Никитина А. В. Особенности энергопотребления и качество электрической энергии в низковольтных сетях промышленных и коммунальных предприятий. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 74–76. (*Scopus*)

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку,  
з якого підготовлено дисертацію:*

7. Загирняк М. В., Прус В. В., Нікітіна А. В. Обоснование перспективных способов определения и представления составляющих мгновенной мощности. *Известия вузов. Электромеханика*, 2009. № 3. С. 3–7.

*Статті у провідних фахових виданнях України*

8. Прус В. В., Нікітіна А. В. Алгоритм визначення складових миттєвої потужності при полігармонічних напрузі і струмі, їх аналіз та інтерпретація. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук: КДПУ, 2004. Вип. 4/2004 (27). – С. 45–50.

9. Прус В. В., Никитина А. В., Буйвол А. А. Разработка устройств контроля мощности и показателей качества электроэнергии в лабораторных и промышленных условиях. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук: КДПУ, 2005. Вип. 2/2005 (31). – С. 19–22.

10. Прус В. В., Никитина А. В. Учет энергопотребления и оценка качества электрической энергии в промышленных сетях низкого напряжения. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*: 2010. Ч. 2. С. 61–66.

11. Никитина А.В. Обоснование целесообразности применения систем технического учета электроэнергии с оценкой качества преобразования ее потребителями. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 4 (32), С. 105 – 111.

12. Бялобржеский А. В., Никитина А. В., Родькин Д. И., Сергиенко С. А. Мешающее энергетическое влияние в электрической цепи с несинусоидальным напряжением и током (К теории энергетических процессов с несинусоидальными сигналами). *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 2 (34), – С. 110 – 123.

***Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:***

13. Прус В. В., Никитина А. В. Экономический аспект использования в системах электроучета составляющих мгновенной мощности. *Тези наукових доповідей 3-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”*. Кременчук: КДПУ, 2004. С. 27–28.

14. Прус В. В., Никитина А. В. Разработка устройств контроля мощности и показателей качества электроэнергии в лабораторных и промышленных условиях. *Тези наукових доповідей третьої Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимі-*

зації». Кременчук: КДПУ, 2005. С. 76–77.

15. Zagirnyak M. V., Prus V. V., Nikitina A. V., Sutormina A. O. Prospects of the use of instantaneous power components to improve the diagnostics truth of electric machine laminated cores. *XII International symposium on electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering*, Spain, Baiona, 2005. P. 58.

16. Прус В. В., Никитина А. В. Сравнительная оценка способа измерения параметров энергопотребления и показателей качества электроэнергии на основе составляющих мгновенной мощности. *Тези наукових доповідей 4-ої всеукраїнської науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»*. Кременчук: КДПУ, 2005. С. 87.

17. Прус В. В., Никитина А. В., Ахметшина М. В. Сравнительный анализ способов определения и представления составляющих мгновенной мощности. *Тези наукових доповідей четвертої Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів „Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”*. Кременчук: КДПУ, 2006. С. 89–90.

18. Никитина А.В. Некачественность электроэнергии во внутренних сетях промышленных предприятий. *Тези наукових доповідей 5-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів”*. Кременчук: КДПУ, 2006. С. 73-74

19. Прус В. В., Никитина А. В. Обоснование эффективности применения современных средств учета электроэнергии в сетях низкого напряжения промышленных предприятий. *I открытая научно-техническая конференция молодых специалистов: сборник докладов в тезисах*. Кременчук: ОАО КВСЗ, 2007. С. 60–61.

20. Прус В. В., Никитина А. В., Маковка А. В. Особенности использования р-q-г-теории мощности с целью компенсации некачественности напряжения в низковольтных сетях. *Шестая Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Электромеханические системы, методы моделирования и оптимизации»: тезисы научных докладов*. Кременчук: КГПУ, 2008. С. 203–204.

21. Прус В. В., Никитина А. В., Маковка А. В. Разработка математической модели для исследования режимов компенсации некачественности сетевого напряжения в низковольтных электрических сетях. *Сьома всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів: тези наукових доповідей*. Кременчук: КДПУ, 2009. С. 311–313.

22. Prus V., Nikitina A., Miljavec D., Zagirnyak M. Analysis of electromagnetic and power processes in circuits containing steel in saturation condition. *Proceedings of the 3rd Symposium on Applied Electromagnetics*. SAEM 2010. Ptuj. Slovenia, 2010. PP. 125–126.

23. Солошич С. Н., Никитина А. В. Разработка технических и программных средств системы автоматического учета и контроля электропотребления с CAN-протоколом нижнего уровня. *Тези наукових доповідей всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» у місті Кременчук 21-22 квітня 2010 р.* Кременчук, КДУ, 2010. С. 47–48.

24. Прус В. В., Никитина А. В. Оценка составляющих мощности и показателей качества электроэнергии в промышленных сетях 0,4 кВ. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: наукове видан-*

ня. Кременчук: КНУ, 2011. Вип. 1/2011 (1). С. 180–181.

25. Никитина А.В. Алгоритм определения составляющих мгновенной мощности однофазной сети. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збір. наук. праць XI Всеукраїнської науково-технічної конф. молодих учених і спеціалістів*, 9–11 квітня 2013 р. Кременчук: КрНУ, 2013. С. 112–113.

26. Никитина А. В., Богодист Ф. Е. Возможности повышения энергоэффективности электроснабжающих сетей административных торговых зданий. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збір. наук. праць XI Всеукраїнської науково-технічної конф. молодих учених і спеціалістів*, 9–11 квітня 2013 р. Кременчук: КрНУ, 2013. С. 160–161.

27. Никитина А. В., Богодист Ф. Е. Возможность создания механизма расчета платы за электроэнергию по показателям мгновенной мощности. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збір. наук. праць XII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук*, 10-11 квітня 2014 р. Кременчук: КрНУ, 2014. С. 163–164.

28. Бялобржеский А. В., Прус В. В., Никитина А. В., Никитина Е. А. Определение и использование мощности искажения при полигармоническом характере мгновенной мощности. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук* 11-12 квітня 2017 р. Кременчук, КрНУ, 2017. С. 125-126.

#### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

29. Деклараційний патент України. Спосіб визначення параметрів енергетичного режиму трифазної мережі з полігармонійними напругою і струмом та пристрій для його реалізації / Родькін Д.Й., Бялобржеський О.В., Резнік Д.В., Нікітіна А.В., Ведмідь Д.С.; власник Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського – № 71354А від 15.11.2004. Бюл. № 11.

### **АНОТАЦІЯ**

**Нікітіна А. В.** Автоматизована система контролю електроспоживання та оцінки якості енергетичних процесів у розподільних мережах низької напруги. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, Кременчук, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми низької якості електричної енергії у розподільних мережах низької напруги промислових підприємств, що чинить суттєвий вплив на режими роботи й електромагнітну сумісність підключених до цих мереж споживачів.

У роботі проаналізовано питання щодо особливостей зміни показників якості (ПЯ) електричної енергії (ЕЕ) у досліджуваних електричних мережах та перспективних методів їх контролю та визначення споживання ЕЕ в умовах промислових під-



приємств. Доведено, що в умовах насиченості розподільних мереж нелінійними споживачами домінуючим фактором погіршення ПЯ є несинусоїдальність струмів, а у цілому ряді випадків і напруги живлення на фоні досить високого рівня їх несиметрії. При цьому особливістю розрахунків енергетичних процесів у зазначених умовах є неможливість безпосереднього використання теорії та методів, застосованих при їх синусоїдній зміні, а з існуючих систем визначення електроспоживання та ПЯ електричної енергії, для розв'язання поставлених задач придатні лише комп'ютерні засоби вимірювання та їх низьковартісні мікроконтролерні аналоги для випадку розподільних вимірювальних систем.

У результаті обумовлено напрямки удосконалення існуючих та особливості розробки нових методів і засобів визначення енергоспоживання та ПЯ електричної енергії через складові миттєвої потужності, що надає можливість впровадження ефективних заходів автоматичної компенсації несиметрії та несинусоїдальності в електричних мережах низької напруги.

Отримано уточнені розрахункові співвідношення для досліджуваних складових енергоспоживання і показників якості електроенергії. Обумовлена можливість формування оплати електричної енергії для окремих споживачів залежно від основних складових потужності, що визначають енергопроцес – активної, реактивної та потужності спотворення.

Доведена ефективність ідентифікації за допомогою розробленого математичного забезпечення однофазних і трифазних споживачів, що спотворюють якість енергетичних процесів у низьковольтних розподільних мережах на основі контролю визначених ПЯ в окремих вузлах мережі.

Визначено шляхи реалізації розроблених методів та засобів у складі автоматичної системи технічного обліку електроенергії та розкрито особливості її побудови та ефективного використання.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі теоретичних положень підтверджується результатами математичного та фізичного моделювання, експериментальних досліджень та дослідною апробацією у промисловості.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність, розподільна електрична мережа, автоматична система, якість електричної енергії, миттєва потужність, автоматична компенсація.

## ABSTRACT

**Nikitina A. V.** An automated system of power consumption control and the assessment of quality of power processes in low voltage distributed networks. – Qualifying scientific work as manuscript.

Thesis for the scientific degree of Cand. Sc. for the specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems (141 – Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kremenchuk, 2021.

The thesis deals with the problem of low quality of electric energy in the low power distribution networks of industrial enterprises, which greatly affects the operation mode and electromagnetic compatibility of the consumers connected to these networks.

The thesis contains the analysis of the issue of the peculiarities of the change of quali-

ty indicators (QI) of electric energy (EE) in the researched electric networks and promising methods of their control and determination of EE consumption in the conditions of industrial enterprises. It is proved that in the conditions of saturation of distribution networks by nonlinear consumers the dominant factor of QI deterioration consists in non-sinusoidal currents and in a number of cases also in supply voltages, against the background of rather high level of their asymmetry. The peculiarity of the calculations of energy processes in these conditions consists in the impossibility of direct use of the theory and methods applicable to their sinusoidal change, and among the existing systems of determination of electric consumption and QI of electric energy, only computer means of measurement and their low-cost microcontroller analogues for a case of the distributed measuring systems are suitable for the solution of the set tasks.

As a result, the directions of improvement of existing methods and means of determination of energy consumption and QI of electric energy via the components of instantaneous power and features of development of new ones are determined, which makes it possible to introduce effective measures of automatic compensation for asymmetry and nonsinusoidality in low voltage electric networks.

Improved calculated ratios for the researched components of energy consumption and electricity quality indicators are obtained. The possibility of forming payment for electricity for individual consumers depending on the main components of power that determine the energy process – active, reactive and distortion power is determined.

The efficiency of identification with the help of the developed mathematical support of single-phase and three-phase consumers that distort the quality of energy processes in low-voltage distribution networks based on the control of certain QI in individual network nodes is proved.

The ways of realization of the developed methods and means as a part of automatic system of technical accounting of the electric power are determined and features of its construction and effective use are revealed.

The reliability of the theoretical propositions obtained in the thesis is confirmed by the results of mathematical and physical modeling, experimental research and experimental testing in industry.

**Key words:** electromagnetic compatibility, distribution electric network, automatic system, quality of electric energy, instantaneous power, automatic compensation.

Нікітіна Альона Вікторівна

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ  
ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ  
МЕРЕЖАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ**

(Автореферат)

Підписано до друку 26.03.2021. Формат 30x42/4.  
Папір Polspeed. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.  
Обліково-видавн. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 20401.

Редакційно-видавничий відділ  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600