

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

БАЦАЛА ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 621.316.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
КОМПЛЕКСУ ЛОКАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ  
ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.  
Робота виконана у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

**Гладь Іван Васильович,**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Кутін Василь Михайлович,**

Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

кандидат технічних наук, доцент

**Грицюк Юрій Віталійович,**

Луцький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електропостачання.

Захист відбудеться «22» березня 2019 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті, МОН України за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «20» лютого 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Генерування електроенергії фотоелектричними станціями (ФЕС) та вітровими електроустановками (ВЕУ) і під'єднання їх до енергосистеми за допомогою перетворювачів струму (інверторів) впливає на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів може створювати додаткові гармоніки в енергосистемах та зменшувати ефективність їх роботи внаслідок порушення стійкості джерела та збоїв у роботі інверторів. Також через зміну кількості виробленої електроенергії ФЕС та ВЕУ, яка постачається в енергосистему і залежить від часу доби, пори року, інтенсивності сонячної інсоляції через хмарність, порушується стійкість та надійність роботи енергосистеми.

Проаналізувавши дослідження, що проводилися в Україні та в інших країнах світу, зроблено висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) на показники якості електроенергії (ПЯЕ) дозволить зменшити втрати електроенергії, збільшити термін роботи електричного обладнання, сповільнити процес старіння ізоляції ліній електропередавання внаслідок дії вищих гармонік напруги та обмежити нагрівання трансформаторів через несиметрію струмів. Велике значення для аналізу впливу ВДЕ на ПЯЕ в енергосистемі має місце приєднання та потужність джерела енергії. Генерування електроенергії ВДЕ в енергосистему може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричних мережах, впливати на відхилення та коливання напруги, величину флікера, надійність роботи й термін експлуатації електричної мережі. Приєднання фотоелектричних та вітрових джерел генерування до електричної мережі може підтримати рівні напруги у вузлах системи в нормованих межах, але необхідно передбачити резерв потужності в енергосистемі для покриття дефіциту потужності у випадку раптового їх відімкнення через природні чинники.

Зміна характеру навантаження в розподільчих електромережах внаслідок приєднання ВДЕ зумовлює необхідність розгляду питань аналізу показників якості електроенергії та електромагнітної сумісності (ЕМС), перегляду стандартів стійкості енергетичних систем та поглиблений аналіз цієї проблематики.

Дослідження питань енергоефективності та електромагнітної сумісності відновлюваних джерел енергії та електромереж, а також моделювання їх роботи відображені в працях вітчизняних та іноземних науковців: Жежеленка І. В., Лежнюка П. Д., Яндутьського О. С., Кулика В. В., Денисюка С. П., Кутіна В. М., Мокіна О. Б., Indranil Saaki, Jian Sun, Swen Teske та інших вчених.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з науковим напрямком діяльності кафедри «Електропостачання та електрообладнання промислових підприємств» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Тематика роботи є частиною планової науково-дослідної програми

з розвитку нафтогазового комплексу України, наукові результати дисертації одержані в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Підвищення енергоефективності та надійності функціонування електротехнічних комплексів нафтової і газової промисловості» (державна реєстрація в УкрІНТЕІ №0110U005845). Робота виконувалася згідно з основними завданнями стратегії розвитку нафтогазової промисловості, зазначеними в Енергетичній стратегії України до 2030 року, та пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки на період до 2020 року, що визначені в статті 3 Закону України від 9 вересня 2010 року № 2519–VI «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Автор брав участь у виконанні вищеназваної роботи як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів з відновлювальними джерелами енергії шляхом розроблення моделей, алгоритмів та комп'ютерно-орієнтованого апаратно-програмного комплексу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні **завдання дослідження**:

- розробити метод прогнозування потужності та кількості генерованої електроенергії ФЕС на основі збору статистичних даних щодо тривалості світлового дня та даних про генерування електроенергії дослідною ФЕС;

- провести аналіз існуючих моделей та методів дослідження режимних параметрів ФЕС, впливу генерування ФЕС на параметри електротехнічних комплексів;

- проаналізувати можливі шляхи підвищення електромагнітної сумісності локальних джерел генерації з електрообладнанням;

- розробити методи врахування експериментально отриманих значень напруг, струмів, їх гармонічних складових та електричних потужностей у вузлі генерування ФЕС;

- розробити та виготовити систему контролю енергетичних параметрів і методик дослідження електромагнітної сумісності та показників якості електроенергії електротехнічних комплексів з фотоелектричними станціями;

- провести експериментальні дослідження рівня електромагнітної сумісності та показників якості електроенергії в місцях приєднання локальних ФЕС до низьковольтних електричних систем;

- на підставі апріорної інформації та експериментально одержаних даних про рівень ЕМС та ПЯЕ у місці приєднання ФЕС до енергосистеми, розробити методи визначення рівнів напруг у вузлах електротехнічних комплексів;

- виконати алгоритмічну та програмну реалізацію запропонованих методів досліджень за допомогою розробленої системи контролю енергетичних параметрів та перевірити їх ефективність.

**Об'єктом дослідження** дисертаційної роботи є сукупність режимів, які виникають в електротехнічних комплексах локальної генерації з ВДЕ.

**Предметом дослідження** є методи і засоби підвищення ефективності режимів та електромагнітної сумісності роботи електротехнічних комплексів локальної генерації з фотоелектричними джерелами енергії.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у роботі завдань використовувалися методи математичного моделювання та чисельні методи. Для аналізу результатів досліджень використано статистичні методи оброблення інформації, методи еквівалентних схем заміщення, основи гармонічного аналізу, метод об'єктно-орієнтованого моделювання *Matlab Simulink* (для створення комп'ютерно-орієнтованих моделей фотоелектричного джерела генерації, інвертора та електричної мережі зі змінним навантаженням), метод раціонального планування експерименту (для перевірки одержаних моделей на адекватність).

Достовірність теоретичних положень підтверджено лабораторними й натурними експериментальними дослідженнями.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше розроблено метод прогнозування кількості електроенергії, яка генерується фотоелектричною станцією з використанням кривої генерації у вигляді гармонічної функції та статистичних даних щодо тривалості світлового дня, що дозволяє визначати потужність її генерації у заданий період часу.

2. Вдосконалено математичну модель електротехнічного комплексу з фотоелектричною станцією, яка враховує сукупність режимних параметрів та показників електромагнітної сумісності, що покращує їх сумісну роботу та зменшує збитки від неякісної електроенергії.

3. Одержав подальший розвиток метод визначення рівнів напруги у вузлах приєднання фотоелектричних станцій на основі апріорної інформації про параметри навантаження, що забезпечив їх функціонування з допустимими відхиленнями напруги.

4. Запропоновано та обґрунтовано нову структуру системи контролю енергетичних параметрів електротехнічних комплексів, яка на відміну від відомих систем спрощує аналіз ефективності роботи відновлювальних джерел в точці приєднання фотоелектричних станцій.

**Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено комп'ютерну модель у середовищі *Matlab Simulink* для дослідження рівнів напруги та показників електромагнітної сумісності ФЕС з метою визначення максимальної потужності генерації в конкретному місці приєднання за умови гранично допустимих ПЯЕ.

2. Запропоновано методику експериментальних досліджень функціонування ФЕС у діючих енергосистемах, яка забезпечує визначення показників ЕМС та режимних параметрів електротехнічних комплексів.

3. Розроблено і впроваджено систему контролю електромагнітної сумісності та енергетичних параметрів електротехнічних комплексів з ФЕС, яка спрощує одержання інформації про фактичні значення цих параметрів в місці приєднання ФЕС.

4. За результатами проведених теоретичних досліджень розроблено алгоритм та програму, за якими можна визначити прогнозовані показники генерації ФЕС за добу, місяць, рік в умовах Карпатського регіону.

Результати роботи впроваджено у ТОВ «Стем Солар» м. Івано-Франківськ у вигляді «Методики прогнозування режимних та енергетичних

параметрів електротехнічних комплексів з сонячними електростанціями за допомогою моделей в середовищі Matlab Simulink», що підтверджено відповідним актом від 06.03.2018 р., а також у ТОВ «Сонце-Покуття» м. Коломия у вигляді методики «Пристрій контролю електромагнітної сумісності та режимних енергетичних параметрів ЕТК з ФЕС», що підтверджено відповідним актом від 23.05.2018 р. Окремі наукові результати впроваджені також в навчальний процес у ІФНТУНГ під час вивчення дисциплін «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Основи енергоефективності» студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (акт впровадження від 19.03.2018 р.), а також були використані під час підготовки наукових звітів з держбюджетних науково-дослідницьких робіт (акт впровадження від 21.03.2018 р.)

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: у статті [1] – запропоновано використання експериментального підходу для енергетичних обстежень електромереж за допомогою універсального апаратно-програмного комплексу та середовища LabView; у статті [2] – на основі експериментальних досліджень проаналізовано несиметрію та гармонічні спотворення в локальних електричних мережах; у статті [3] – після експериментальних досліджень на ФЕС виявлено відхилення ПЯЕ від нормованих значень та причини неефективної роботи джерела генерації при заданих параметрах роботи, запропоновано принципи аналізу та опис чинників, що впливають на якість електроенергії; у статті [4] – запропоновано шляхи підвищення ефективності сумісної роботи ФЕС з енергосистемою за допомогою удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії, розроблено додаткові підпрограми пофрагментної обробки сигналу та розрахунку коефіцієнтів несиметрії напруг та струмів, енергетичних та економічних показників ефективності роботи електрообладнання; у статті [5] – після обробки експериментальних даних вимірювань здійснено спектральний аналіз кривих напруги та струму й проведено аналіз ефективності роботи електрообладнання за допомогою сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (THD); у статті [6] – сформульовано принципи застосування інформаційно-вимірювальної системи контролю та математичних моделей для визначення впливу ФЕС на ефективність роботи електрообладнання з метою вибору його оптимального режиму роботи та проаналізовано залежність спектру струму та сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень від режиму роботи електробурів і досліджено несиметрію струмів; у статті [7] – експериментально доведено вплив ФЕС на ЕМС та проведено дослідження динамічних режимів мережі для локальної мережі з фотоелектричними джерелами, виявлено резонансні процеси та коливання реактивної потужності під час сумісної роботи ФЕС з мережею, запропоновано методику врахування впливу збитків від низької електромагнітної сумісності на прибуток від генерування; у статті [8] – запропоновано спосіб підвищення ефективності ЕТК з використанням комп'ютерно-орієнтованих моделей та інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів,

досліджено зміни реактивної потужності зсуву та спотворення під час генерування електроенергії та запропоновано спосіб контролю за зміною реактивної потужності.

Результати досліджень, що викладені у [1] – [19], були одержані у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати наукових досліджень дисертаційної роботи доповідалися і одержали позитивну оцінку на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика - 2013» (2013 р., м. Івано-Франківськ,) [9], V МНТК «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (2014 р, м. Луцьк) [10], Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика - 2015» (2015 р., м. Івано-Франківськ) [11], Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (2015-2016 р.р., м. Маріуполь) [12, 14, 15], Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (2014 р., м. Тернопіль) [13], Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (2016 р., м. Луцьк) [16], XLVI Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького НТУ, (2017 р., м. Вінниця) [17], VI Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика 2017", (2017 р., м. Івано-Франківськ) [18], V Міжнародній конференції "Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'17" (2017 р., м. Київ) [19], та щорічних науково-технічних семінарах професорсько-викладацького складу кафедри електропостачання та електрообладнання промислових підприємств ІФНТУНГ (2009–2017 р.р.).

**Публікації.** Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковані у 19 друкованих наукових працях, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України (1 з них входить до наукометричної бази даних *Scopus*), та 11 публікацій у збірниках матеріалів та доповідей міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференцій (2 одноосібні).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 125 сторінок основного друкованого тексту, 92 рисунки, 7 таблиць, список використаних джерел із 119 найменувань та шість додатків. Загальний обсяг роботи – 191 сторінка.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі досліджень. Вказана наукова новизна та практична цінність одержаних результатів. Наведені відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача та публікації. Показаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому** розділі проаналізовано перспективи розвитку відновлювальної енергетики та проблеми, що можуть виникати при під'єднанні ВДЕ до локальних електротехнічних комплексів (ЕТК). Здійснено аналіз чинників, що призводять до неефективних режимів фотоелектричних джерел та негативно впливають на їх електромагнітну сумісність.

Проведено аналіз застосування математичних моделей, які використовують для моделювання електротехнічних комплексів з ВДЕ. Оскільки рівень генерації ФЕС та ВЕУ залежить від зовнішніх чинників, а також від зміни параметрів електромережі, то необхідним є врахування їх впливу на режим роботи в сезонних (що відображають вплив температури повітря, сонячної інсоляції, швидкості вітру тощо) та соціальних (що відображають вплив зміни укладу життя у робочі та вихідні дні) чинників зовнішнього середовища під час їх роботи.

Забезпечення якості електроенергії та електромагнітної сумісності ФЕС при дозволеному рівні генерації потребує узгодження параметрів та місць їх під'єднання в розгалуженій електромережі, а також додаткових вимірювань за наявності генерування енергії зі складовими напруги вищих гармонік. Граничні відхилення напруги у місці приєднання ФЕС до мережі спричинюють обмеження потужності генерації ФЕС, що знижує їх ефективність. Тому виникає необхідність застосування математичних моделей, які б враховували динамічний режим роботи через нелінійність параметрів навантаження та їх змінність у часі у вказаних умовах функціонування.

Запропоновано експериментальне визначення ПЯЕ та ЕМС фотоелектричних джерел генерації з інверторами за допомогою розкладання напруги і струму на гармонічні складові.

У **другому розділі** запропоновано використання переносної «системи контролю» (СК) для аналізу енергетичних параметрів (рис. 1), яка побудована шляхом системної інтеграції із застосуванням технології віртуальних приладів і середовища графічного програмування LabVIEW. СК містить три сенсори напруги CV3-1000 і чотири сенсори струму типу струмових кліщів з аналоговим виходом АТА-2502, які приєднані до входів 16-розрядного АЦП NI USB-6210. Останній по USB з'єднується з портативною ЕОМ із встановленим програмним забезпеченням, яке реалізує зчитування інформації з АЦП, розрахунок і візуалізацію ПЯЕ. Програмне забезпечення містить підпрограми стандартних алгоритмів цифрової обробки сигналів (швидке перетворення Фур'є, визначення середньоквадратичного значення та ін.), візуалізації інформації та записування у файл на жорсткому диску ЕОМ у двійковому форматі tdms.



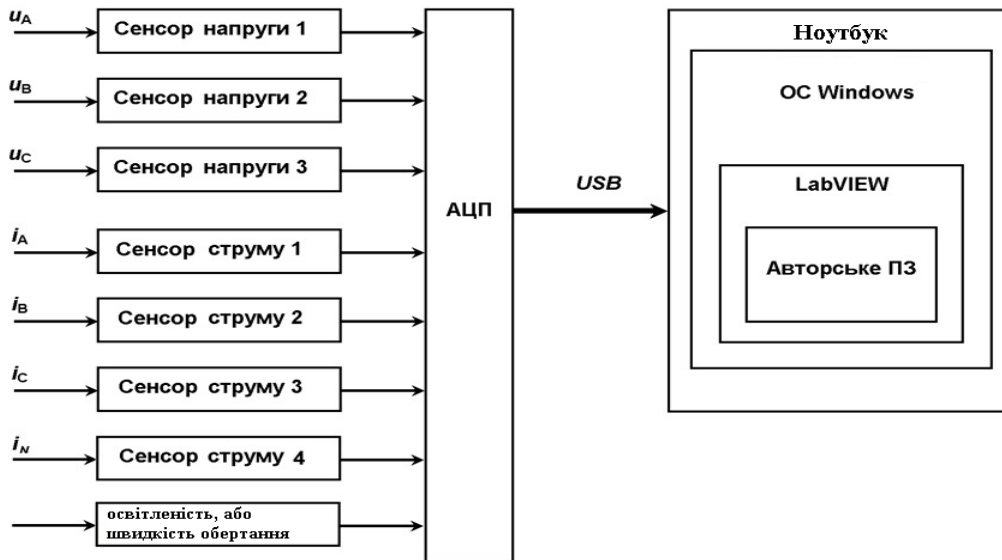


Рисунок 1 - Структурна схема СК для експериментальних досліджень ЕТК

При створенні програмного забезпечення СК використано елементи лінійного та циклічного програмування у поєднанні з умовними переходами. Алгоритм роботи розроблених прикладних програм «Пофрагментна обробка потужності.exe», «Несиметрія.exe», «Гармоніки.exe» подібний, але ці програми відрізняються підпрограмами математичної обробки.

Обчислення діючого значення фазних напруги та струму, повної, активної та реактивної потужності, а також коефіцієнту потужності реалізується програмою «Пофрагментна обробка потужності.exe», блок-діаграма математичної обробки якої якої представлена на рис. 2.

Переносна СК забезпечує візуальне спостереження за напругами і струмами в електромережі під час експериментального дослідження у разі виникнення проблем у роботі ФЕС. Визначення потужності, гармонічних складових, ПЯЕ проводяться в лабораторних умовах на основі файлу tdms.

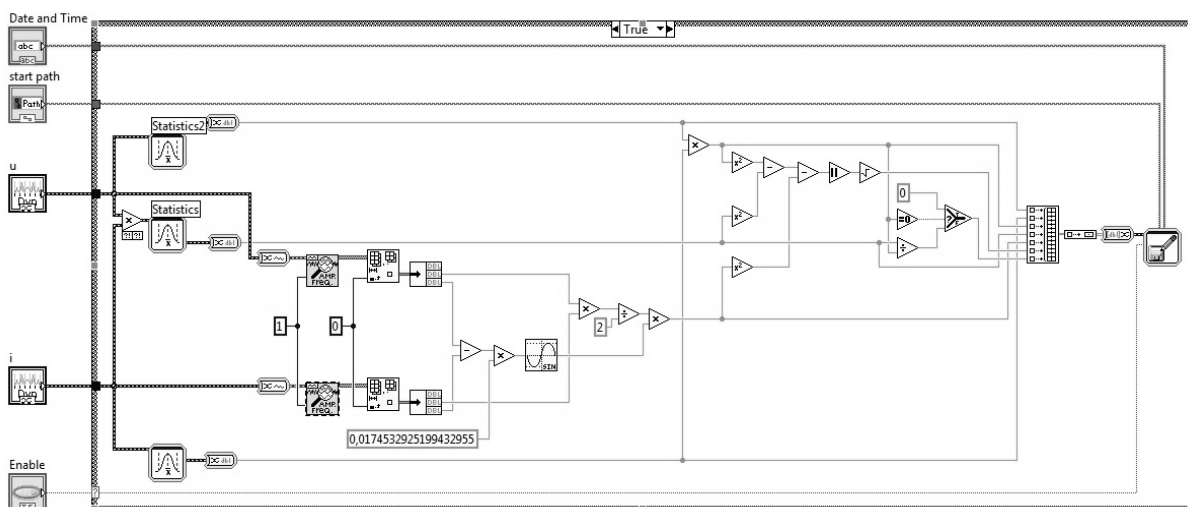


Рисунок 2 - Блок-діаграма підпрограми «U I S P Q T PF array»

Розроблену СК повірено методом зіставлення результатів вимірювання за допомогою сертифікованого аналізатора ПЯЕ METREL MI 2892.

Діючі значення гармонічних складових напруги  $n$ -х гармонік  $U_{(n)}$  обчислюються за методами цифрової обробки сигналів на базі швидкого перетворення Фур'є (рис. 3).

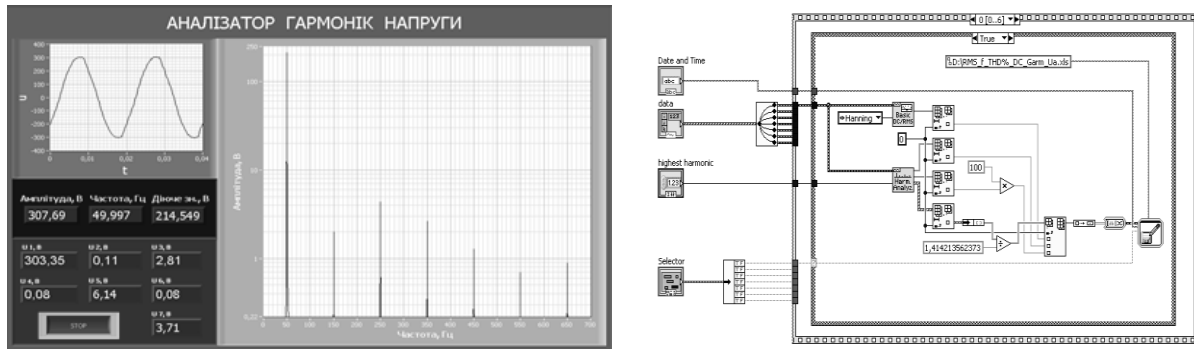


Рисунок 3 - Фронтальна панель та блок-схема віртуального приладу для обчислення гармонічних складових напруги

У **третьому розділі** наведено доцільність використання апаратно-програмного забезпечення для отримання енергетичних параметрів в діючих електротехнічних комплексах з фотоелектричними станціями.

Визначення максимально точного значення генерації електроенергії ФЕС в заданий період часу обумовлено законом «Про ринок електричної енергії України», який стимулює підвищення ефективності ФЕС, шляхом реалізації алгоритмів мінімального небалансу з мережею, точного прогнозування, а також оптимізації перетікань активної та реактивної енергії в розподільчих мережах.

Варіація метеорологічних параметрів залежить від географічного розташування ФЕС, а також від погодних умов, тому немає однакових залежностей впливу метеорологічних параметрів на генерацію електроенергії ФЕС в різних географічних місцях. Крім того, кореляція між метеорологічними параметрами та вихідною потужністю не буде однаковою в різних точках розташування ФЕС. Доведено що, ефективність прогнозування суттєво залежить від співвідношення вхідних і вихідних параметрів моделі. У цьому випадку важливим є аналіз співвідношень між різними метеорологічними факторами, такими як сонячна інсоляція, атмосферна температура, температура фотомодуля, швидкість і напрямок вітру, а також вологість під час роботи ФЕС.

Рівень потужності ФЕС залежить від температури та величини сонячної інсоляції і обчислюється шляхом прямого використання інформації про погоду, або визначається за допомогою формул:

$$T_{PV} = T_i + E_{\beta} \frac{(T_0 - 20)}{0,8}, \quad (1)$$

$$I_{PV} = I_{\beta} (I_K + k_i (T_0 - 25)), \quad (2)$$

$$U_{PV} = U_X - k_U T_{PV}, \quad (3)$$

$$P_{PV} = N \cdot FF \cdot U_{PV} I_{PV}, \quad (4)$$

$$FF = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_X I_K}, \quad (5)$$

де  $T_{PV}$  - фактична температура на сенсорі фотомодуля,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_i$  - температура навколишнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_{\beta}$  - величина сонячної інсоляції,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $T_0$  - температура на сенсорі фотомодуля за температури навколишнього середовища  $20^{\circ}\text{C}$ , сонячної інсоляції  $800 \text{ Вт}/\text{м}^2$  та швидкості вітру  $1 \text{ м}/\text{с}$ ;  $I_K$  - струм короткого замикання;  $k_i$  - струмо-температурний коефіцієнт,  $\text{А}/^{\circ}\text{C}$ ;  $U_x$  - напруга холостого ходу;  $k_U$  - напруго-температурний коефіцієнт  $\text{В}/^{\circ}\text{C}$ ;  $FF$  - коефіцієнт (full factor);  $U_{MPPT}$  - напруга при пошуку максимальної потужності (MPPT - Maximum power point tracker);  $I_{MPPT}$  - струм при MPPT.

Аналіз зміни інтенсивності сонячної інсоляції вказує на необхідність використання припущень, згідно з якими місячні суми сонячної радіації на горизонтальну поверхню змінюються щорічно, проте їх середні багаторічні значення стійкі. Крім того, існує варіаційний характер сонячної радіації для окремої досліджуваної місцевості, а для оцінки ефективності роботи фотомодулів доцільно врахувати локальні характеристики місцевості (розташування поверхонь фотомодулів відносно кутів падіння сонячних променів у заданий момент часу, широти місцевості, зенітного кута Сонця).

У роботі описано графік вироблення енергії ФЕС за допомогою гармонічної функції. Розрахунки виконані з припущеннями, що фотомодулі розташовані горизонтально, зміну кута нахилу осі Землі до площини її орбіти обертання навколо Сонця, а також температуру навколишнього середовища не враховувались.

Прогнозована кількість електроенергії, яку виробляє ФЕС у будь-який день року, можна описати рівнянням

$$W_{G_i} = W_{G_{MAX}} \sin(\delta + \varphi) \pm k_1 W_{C_i}, \quad (6)$$

де  $\delta$  - зведена характеристика часу генерації, яка змінюється від  $0^{\circ}$  до  $180^{\circ}$  протягом року;  $W_{G_{MAX}}$  - максимальна кількість електроенергії, яку ФЕС може згенерувати за день;  $k_1 = \frac{|T_c - T_i|}{T_c}$  - коефіцієнт, який характеризує рівень

хмарності заданого дня і залежить від метеоданих;  $T_i$  - кількість абсолютно ясних сонячних годин в заданому дні;  $T_c$  - середня кількість сонячних годин заданого дня згідно статистичних метеоданих;  $W_{C_i}$  - середня кількість електроенергії, яка генерується ФЕС в заданому дні згідно зі статистичними даними;  $\varphi$  - коефіцієнт, який враховує початок відліку (день року, коли починається збільшення тривалості світлового дня).

Знак (-) у рівнянні (6) застосовуємо за умови, що  $T_i < T_c$ , знак (+) для значень  $T_i > T_c$ .

Проведено накладання на вісь абсцис одночасно днів року та зведену характеристику часу генерації ( $\delta$ ). Найбільша тривалість світлового дня в Івано-Франківську (16 годин 12 хвилин) спостерігається з 19-го по 21 червня. Відносно даної точки (20 липня,  $\delta = 90^{\circ}$ ) проводимо криву  $f(x) = 5 \sin \delta$ . Найменша тривалість світлового дня (8 годин 14 хвилин) на початку та в кінці

року, а саме 18-23 грудня знову розпочинається збільшення світлового дня (рис. 4).

Кількість виробленої енергії кожного  $i$ -го дня опишемо рівнянням

$$W_{G_i} = W_{G_{MAX}} \sin\left(\frac{y+8}{2}\right)^\circ \pm k_1 W_{C_i} \text{ для днів від 1 січня по 17 грудня при } y=1 \div 352,$$

$$W_{G_i} = W_{G_{MAX}} \sin\left(\frac{y-352}{2}\right)^\circ \pm k_1 W_{C_i} \text{ для днів з 18 грудня по 31 грудня при } y=353 \div 365.$$

Точне прогнозування кліматичних умов обраних днів є досить складною задачею, тому припускаємо, що кількість електроенергії, яку генеруватиме ФЕС протягом обраного дня буде знаходитися у визначному діапазоні (в межах між максимальними та мінімальними статистичними значеннями). Фактично цей діапазон використано в моделі вироблення електроенергії ФЕС для дослідження режимів роботи електротехнічних комплексів, при цьому в алгоритмі визначення кількості згенерованої електроенергії та потужності ФЕС можна використовувати як табличні дані, так і рівняння, які описані вище. Розрахунок тривалості сонячного дня року та кількості виробленої електроенергії ФЕС за допомогою гармонічної функції проводимо в програмах «Прогнозування.xls», «Нормальний розподіл.xls».

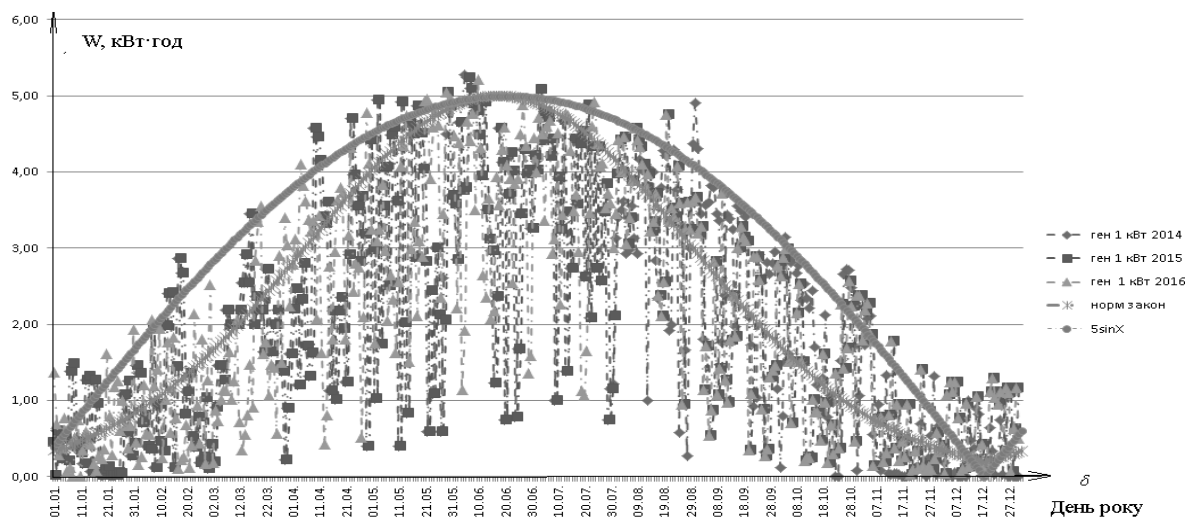


Рисунок 4 - Апроксимація кривої кількості енергії, що генерує ФЕС потужністю 1 кВт протягом року

Для прогнозування розвитку процесів генерування електроенергії ФЕС доцільно використати часові ряди. Оскільки, наш часовий ряд є нестационарним, тому використаємо ковзне середнє значення  $m_z(t)$  для дискретного у часі випадкового процесу  $Z_t$ . В роботі використано апарат гратчастих функцій. Похідна для таких функцій має еквівалент у вигляді першої різниці сусідніх значень цієї решітчастої функції, яка є дискретною.

Висловимо припущення, що споживачі до ФЕС під'єднано постійно і опишемо енергію, яку виробляє ФЕС за допомогою решітчастої функції. Для моделі прогнозу використана модель авторегресії - проінтегрованого ковзного середнього (АРПКС), що дозволяє встановити значення координати процесу у

вибраний момент часу на основі своїх попередніх значень, використавши оператор суми (або інтегрування)  $S^d$ , оператор зсуву назад на одиницю часу  $B$ , різницевий оператор зсуву назад на одиницю часу  $\nabla$  та оператор ковзного середнього  $\Theta(B)$ .

$$Z_t = \nabla^{-d} w_t = S^d w_t. \quad (7)$$

Дискретний у часі випадковий процес  $Z_t$  можна описати за допомогою наведених операторів та рівнянь:

$$\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}, \quad (8)$$

$$Z_{t-1} = BZ_t, \quad (9)$$

$$\nabla = 1 - B. \quad (10)$$

Для синтезу моделі прогнозу майбутніх значень нестационарного часового ряду (нестационарного дискретного випадкового процесу генерації енергії на ФЕС протягом кожного дня року) його необхідно спочатку привести до вигляду «стаціонарного».

Для стаціонаризації, судячи з наведеного графіка, побудованого з використанням експериментальних даних, достатньо використати лише першу різницю сусідніх значень решітчастої функції, якою описується процес вироблення енергії на ФЕС (рис. 5).

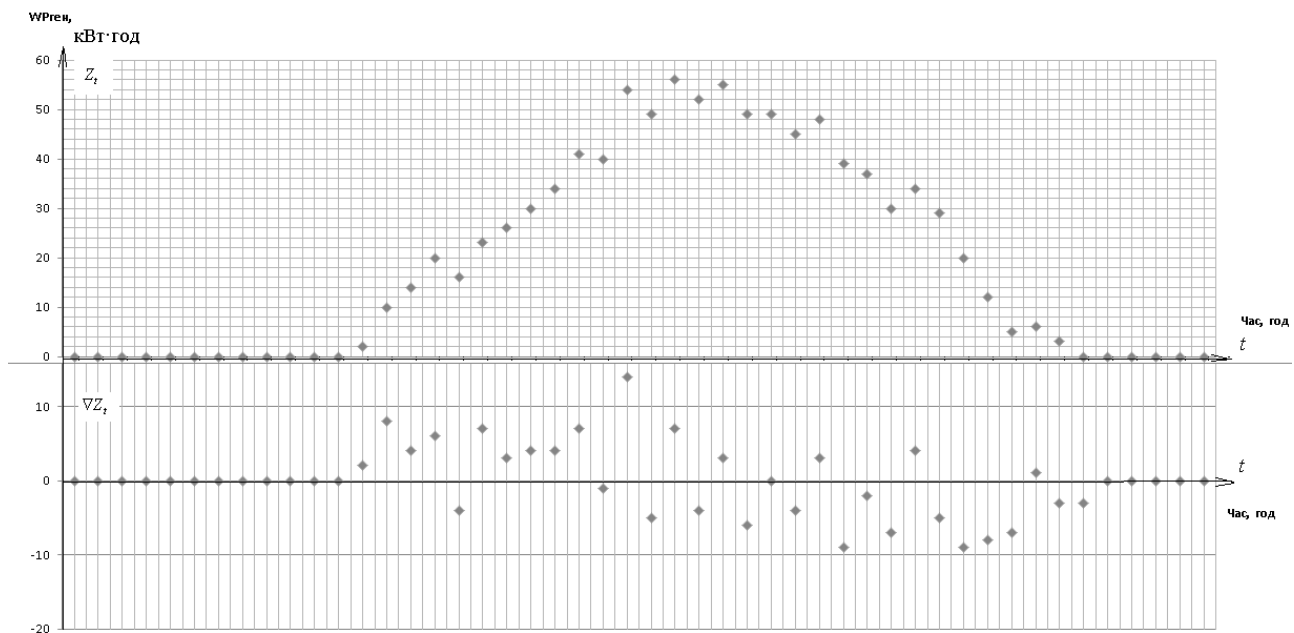


Рисунок 5 - Графічна інтерпретація перетворення нестационарного часового ряду  $Z_t$  у стаціонарний ряд його різниці  $\nabla Z_t$

Модель вибраного часового ряду для прогнозування наступних значень побудовано за відомою методикою на основі авторегресій 1-го, 2-го чи 3-го порядку, залежно від необхідної точності розрахунку:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_q z_{t-q} + \xi_t, \quad (11)$$

де  $\xi_t$  - імпульс білого шуму в прогнозований момент часу  $t$ ,

$z_t = y_t - \mu_t$  - прогнозоване у дискретний момент часу  $t$  значення стохастичної складової вихідної координати  $y$ , яка задається лише у дискретні моменти часу і носить у цьому випадку назву часового ряду.

Модель авторегресії у вигляді (11) є справедливою лише для стаціонарних часових рядів, тобто для таких стохастичних дискретних послідовностей  $y_t$ , для яких середнє значення (математичне очікування)  $m_y$  і дисперсія  $\sigma_y^2$ , що характеризує розкид значень часового ряду навколо його середнього значення, розраховуються з використанням співвідношень:

$$m_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \mu, \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N z_i^2. \quad (13)$$

Як приклад, розрахована прогнозна модель для обраного місяця (липень) у вигляді авторегресії  $Z_t$  другого порядку з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2} = 2,77$ ;  $\mu = 4,1$ .

$$z_t = -0,5445z_{t-1} - 0,027\phi_2 z_{t-2} + \xi_t,$$

Програма розрахунку коефіцієнтів для АРПКС потребує перерахунку для кожного моменту часу і кожного окремого часового ряду, а тому розрахунок проводимо за допомогою розробленої комп'ютерної програми («АРПКС ФЕС»).

Синтез експериментальних вимірювань та методики прогнозування рівня генерування ФЕС дає можливість більш точно оцінити їх параметри, що дозволить запропонувати реалізацію оптимальних режимів роботи електротехнічних комплексів з локальними джерелами генерації.

Для дослідження режимів електротехнічних комплексів з ВДЕ застосовано розроблену СК, що дає змогу проаналізувати ПЯЕ та електромагнітну сумісність та дослідити вплив параметрів ФЕС на роботу електрообладнання. За допомогою експериментальних досліджень енергетичних параметрів ФЕС «Радче» (Івано-Франківська область) зроблено висновок, що за нормального режиму на досліджуваній ФЕС відбувається генерація електричної енергії з дотриманням чинних стандартів, проте необхідна оцінка ефективності приєднання ФЕС в мережу з невідомими параметрами з метою оцінки електромагнітної сумісності.

При проведенні вимірювань на шинах 0,38 кВ трансформаторної підстанції ТП-761 ФЕС «Радче», було виявлено відмикання груп інверторів, які відбувалися спонтанно і впливали на кількість виробленої активної електроенергії. На рис. 6 зображено графік зміни активної потужності ФЕС, який умовно можна розділити на чотири періоди.

Після опрацювання даних вимірювань зроблено висновок, що на затискачах ТП ФЕС присутнє коливання активної, і відповідно, повної потужності, реактивна потужність практично відсутня. Рівень реактивної потужності зсуву та спотворення практично незмінний, але має різкі зміни під час відключення частини інверторів та за інших перехідних процесів (рис. 7).

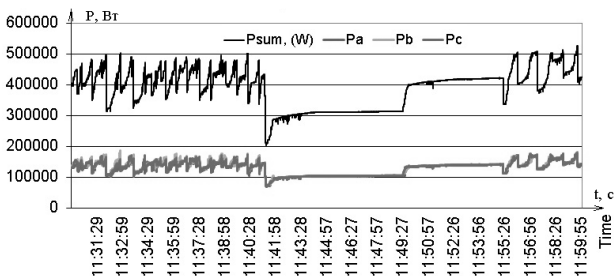


Рисунок 6 - Графіки зміни активних потужностей ТП ФЕС «Радче»

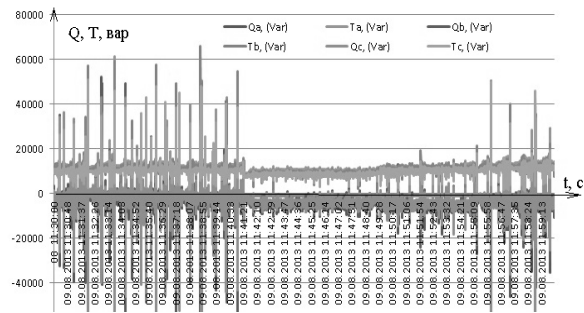


Рисунок 7 - Графіки зміни реактивної потужності зсуву та спотворення ТП ФЕС «Радче»

Контроль за зміною реактивної потужності спотворення дає змогу забезпечити більш ефективну роботу електротехнічних комплексів, правильно вирішувати питання компенсації і вибрати параметри фільтро-компенсувальних пристроїв.

У четвертому розділі наведено результати практичних досліджень, метою яких є підтвердження працездатності та ефективності запропонованих методів та алгоритмів на базі розробленої комп'ютерної (математичної) моделі в середовищі Matlab Simulink, що забезпечує аналіз рівнів напруги та показників ЕМС в вузлах електротехнічних комплексів з приєднанням локальних відновлювальних джерел енергії.

Проведено дослідження впливу зміни режимних параметрів ФЕС на ефективність роботи електротехнічних комплексів, зокрема визначено зміну коефіцієнтів несиметрії напруги при вмиканні однофазної ФЕС до різних фаз приєднання підприємства в м. Івано-Франківську (рис. 8).

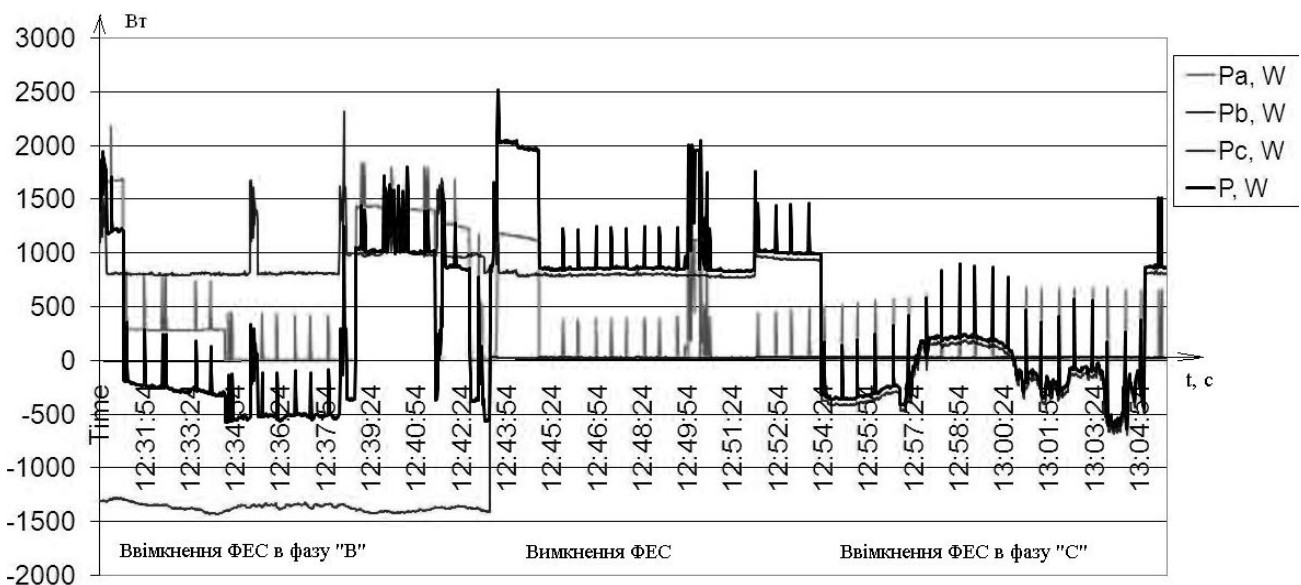


Рисунок 8 - Графіки зміни активної потужності трифазної мережі підприємства з приєднаною однофазною ФЕС

З рис. 8 видно, що на першому етапі досліджень (генерація в фазі В, зелений колір) струм відстає від напруги на  $180^{\circ}$  і має синусоїдний характер. Крива струму фази С, до якої приєднано комп'ютери має гармонічну складову. На рис. 8 (б) та (в) показано криві струмів в трьох фазах при підключенні ФЕС у фазу С. Одночасно змінюється кількість генерованої та спожитої електроенергії, які додаються, а форма синусоїди струму в фазі С має деформовану обрізану форму.

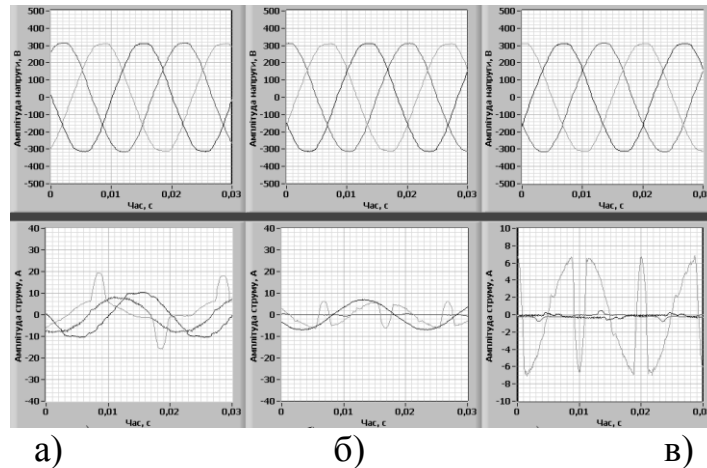


Рисунок 9 - Панель «Реєстратора», яка відображає графіки зміни миттєвих значень струму та напруги в трьох фазах

Під час генерації в фазі В коефіцієнт потужності і реактивна потужність практично не змінюються, однак при перемиканні даної ФЕС у фазу С відбувається коливання реактивної потужності зсуву та спотворення (рис.10), яке припиняється з вимкненням інвертора. Крім того, вимірювальний комплекс зафіксував таке саме коливання коефіцієнта потужності, що може призвести до проблем з регулюванням реактивної потужності засобами компенсації. Значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень на першому етапі досліджень становило 5-7 %, а на третьому етапі під час генерації в фазу С, THD струму збільшився до 21-31 %, що не відповідає нормованим значенням.

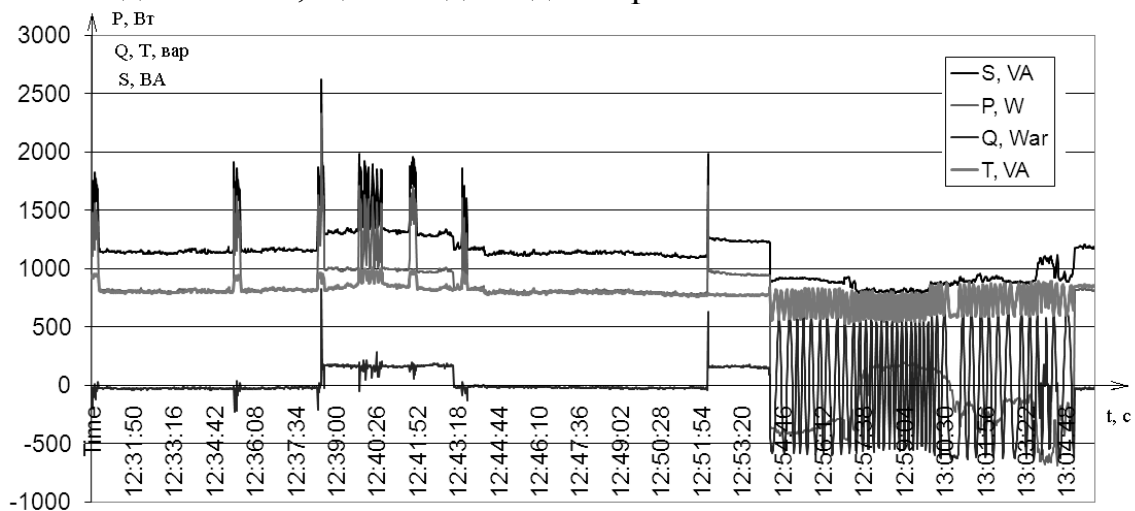


Рисунок 10 - Графіки зміни повної, активної та реактивних потужностей зсуву і спотворення підприємства



Вдосконалено математичну модель ФЕС, яка враховує експериментально отримані значення напруг та їх гармонічних складових, частоти та потужності.

У процесі досліджень сформовано статистичну базу даних генерування електроенергії ФЕС в середовищі Microsoft Excel та Matlab, яка охоплює дані генерування за добу та кожні півгодини. Створено програмний продукт та реалізовано алгоритми, які дозволяють одержати значення кількості виробленої електроенергії електростанцією на базі даних про час генерування (рис. 11).

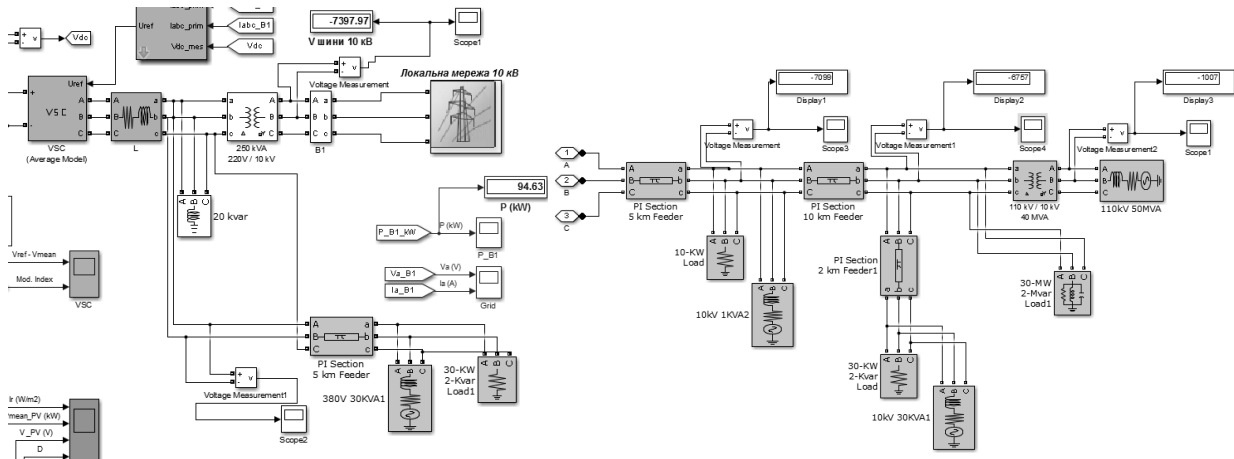


Рисунок 11 - Фрагмент підпрограми локальної мережі, до якої приєднано ФЕС

Основним завданням розробленої програми є мінімізація втрат в електротехнічних комплексах та одержання максимального прибутку від генерації електроенергії локальними ФЕС.

$$\Delta S \rightarrow \min, \Pi \rightarrow \max. \quad (14)$$

Розроблена модель дасть можливість прогнозувати зміну рівня напруги в точках приєднання джерел генерування за одночасної зміни параметрів системи, або додатково увімкнених інших ФЕС.

Математичне моделювання проведене в середовищі Matlab Simulink показало, що важливе значення для забезпечення ефективної сумісної роботи ФЕС в мережі має місце під'єднання. Так, при під'єднанні ФЕС в кінці ліній втрати потужності та відхилення напруги у приєднаній мережі збільшуються.

Для техніко-економічної оцінки роботи ФЕС використано цільову функцію оптимізації COE (Cost of Energy) – вартість електроенергії на виході ВДЕ, а також загальний прибуток від продажу електроенергії TIOES (Total Income of Energy Sold)

$$TIOES = \Pi_{\Delta W} - B_{мер} - TAC - Z_{EMC}, \quad (15)$$

де  $\Pi_{\Delta W}$  - річний прибуток від проданої електроенергії за «зеленим тарифом»;

$B_{мер}$  - вартість річної спожитої електроенергії з мережі;  $TAC$  - (Total Annualized Cost) - сумарна вартість коштів, витрачених на ВДЕ, її встановлення та експлуатацію з урахуванням інфляції та ставки дисконтування;  $Z_{EMC}$  - збитки від несинусоїдності та несиметрії через роботу ВДЕ.

Електромагнітна складова збитків від втрат електроенергії може мати дві складові: збитки від несинусоїдності та збитки від несиметрії напруги.

Додаткові втрати активної потужності, що зумовлені несинусоїдністю

$$\Delta P_{NSIN} = \frac{\Delta P_H}{Z_{1*}} \sum_{n=2}^S \frac{U_{H*}}{n\sqrt{n}}, \quad (16)$$

де  $\Delta P_H$  - втрати активної потужності в трансформаторі при нормальному режимі для частоти основної гармоніки, кВт;  $Z_{1*} = \frac{Z_1}{Z_H}$  - відносний повний опір елемента мережі для струму основної гармоніки;  $U_{H*} = \frac{U_n}{U_H}$  - відносне значення напруги  $n$ -ої гармоніки;  $n$  - кількість гармонік, які враховуються.

З врахуванням втрат через несинусоїдність річні збитки, зумовлені втратами потужності через несинусоїдність:

$$Z_{NSIN} = \beta T_C \Delta P_{NSIN} 10^{-3}, \quad (17)$$

де  $\beta$  - вартість втрат електроенергії.

Додаткові втрати від несиметрії

$$\Delta P_{NS} = \Delta P_H K_{2U}^2 \rho_{NS}, \quad (18)$$

де  $K_{2U}$  - коефіцієнт несиметрії напруги, %;  $\rho_{NS} = \frac{0,6}{U_K}$  - індекс втрат.

Відповідно річні збитки від несиметрії

$$Z_{NS} = \beta T_C \Delta P_{NS} 10^{-3}. \quad (19)$$

Розраховані максимальні втрати від несинусоїдності та несиметрії через роботу ФЕС згідно з вимірними значеннями параметрів режиму за допомогою розробленої системи контролю енергетичних параметрів. Розроблена програма розрахунку втрат в трансформаторах від неякісної електроенергії. Наведений розрахунок дає змогу більш коректно визначити розмір прибутку від продажу електроенергії, оцінити втрати через несинусоїдність та несиметрію, а також за необхідності після рекомендації засобів симетрування та фільтрів вищих гармонік, визначити зменшення втрат електроенергії в електротехнічних комплексах через неякісну електроенергію.

Додатково проведено розрахунок недовідпуску електроенергії ФЕС «Радче» через відмикання інверторів. Недогеновано через проблеми з електромагнітною сумісністю 436395 кВт·год електроенергії, відповідно недотримано прибутку 754090,6 грн за рік (23,5 % від запланованого прибутку). Вирішення цієї проблеми завдяки заміні схеми увімкнення обмоток трансформаторів ТП відновило ефективну роботу ФЕС.

Отже, розроблені алгоритми та програмні засоби дозволяють розв'язувати оптимізаційні задачі окремо, або у комплексі, що забезпечує безперервну роботу електротехнічних комплексів з ВДЕ з вищою ефективністю та електромагнітною сумісністю. На основі одержаних у дисертаційній роботі результатів експериментальних досліджень, запропонованих методів та алгоритмів вдосконалено процес проектування та введення в експлуатацію нових фотоелектричних станцій.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності функціонування фотоелектричних станцій шляхом розроблення математичних моделей і методів визначення їх режимних параметрів та електромагнітної сумісності, що забезпечує підвищення ефективності електротехнічного комплексу локальної генерації з відновлювальними джерелами енергії.

Приведені дослідження дозволили одержати такі наукові та практичні результати:

1. На підставі статистичних даних щодо тривалості світлового дня та кількості електроенергії, яка генерується дослідною фотоелектричною станцією, розроблено новий метод прогнозування згенерованої кількості електроенергії з використанням апроксимації кривої генерації гармонічною функцією.

2. Для визначення максимальної потужності генерації фотоелектричної станції в місці приєднання за умови допустимих показників якості електроенергії розроблено комп'ютерну модель в середовищі Matlab Simulink, яка забезпечує аналіз рівнів напруги та показників електромагнітної сумісності в електротехнічних комплексах.

3. Ефективність роботи фотоелектричних станцій залежить від режимних параметрів електротехнічних комплексів та якості електроенергії. Для дослідження їх режимів роботи вдосконалено математичну модель, яка враховує експериментально одержані значення напруг та їх гармонічних складових, частоти та потужності.

4. Для одержання інформації про режимні параметри та електромагнітну сумісність запропоновано методику експериментального дослідження функціонування фотоелектричних станцій в діючих електротехнічних комплексах з використанням переносної системи контролю та аналізу енергетичних параметрів.

5. Граничні відхилення напруги у місці приєднання фотоелектричних станцій обмежують потужність генерації, що знижує їх ефективність. Удосконалено метод визначення рівнів напруг у вузлах електротехнічних комплексів з локальними електростанціями, який враховує апіорну інформацію про параметри навантаження. Використання цього методу дозволяє визначити максимальну потужність генерації фотоелектричної станції з гранично допустимими значеннями відхилення напруги в місці приєднання.

6. Розроблено переносну систему контролю, яка дозволяє в реальному часі у діючих електроустановках реєструвати та аналізувати енергетичні параметри електротехнічних комплексів. Структура та конструктивне виконання розробленої системи забезпечує гнучкість налаштування та використання в процесі експериментальних досліджень

7. Запропоновані в дисертаційній роботі методи, засоби, алгоритми та проведені експериментальні дослідження дозволять забезпечити роботу електротехнічних комплексів з відновлювальними джерелами енергії з вищою

ефективністю та електромагнітною сумісністю. На підставі одержаних у дисертаційній роботі результатів експериментальних досліджень, запропонованих методів та алгоритмів вдосконалено процес проектування та введення в експлуатацію нових фотоелектричних станцій.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] І. В. Гладь, І. Д. Галушак, А. І. Поточний, У. М. Маскевич, Я. В. Бацала, О. І. Кіянюк, «Проблеми та принципи проектування універсального апаратно-програмного комплексу для енергетичних обстежень електромереж», *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, Вип. 3, с. 83-87. 2008.

[2] І. В. Гладь, О. І. Кіянюк, Я. В. Бацала, «Аналіз параметрів електроспоживання навчального корпусу № 1 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу», *Нафтогазова енергетика*, Вип. 2, с. 100-103. 2009.

[3] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, У. М. Николин, «Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції». *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, Вип. 4, с. 81-90. 2013.

[4] Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О. І. Кіянюк, «Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлювальних джерел енергії», *Нафтогазова енергетика*, Вип. 1, с. 52-60. 2015.

[5] М. Й. Федорів, І. В. Гладь, І. Д. Галушак, Я. В. Бацала, І. М. Михайлів, «Підвищення показників надійності та енергоефективності електрообладнання бурильних установок», *Розвідка та розробка нафтових і газових свердловин*, Вип. 3 (60), с. 64-70. 2016.

[6] М. Й. Федорів, І. В. Гладь, І. Д. Галушак, Я. В. Бацала. «Підвищення надійності та енергоефективності електропривідних бурильних установок», *Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ*, Вип. 2, с. 93-98. 2017.

[7] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Експериментальне дослідження несиметричного режиму низьковольтної мережі при однофазному генеруванні електроенергії сонячною електростанцією», *Нафтогазова енергетика*, Вип. 1, с.123-131. 2017.

[8] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Вплив сонячних електростанцій на низьковольтні розподільні мережі», *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ. КПІ ім. Сікорського, Вип. 3 (49), с. 82-86. 2017.

[9] Я. В. Бацала, «Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції», *Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика - 2013»* 7-11 жовтня 2013 р. ІФНТУНГ. м. Івано-Франківськ, Факел, 2013. с. 206-208.

[10] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, О. І. Кіянюк, «Експериментальне дослідження енергетичних параметрів електротехнічних комплексів із застосуванням технологій віртуальних приладів», *V МНТК «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах»*, 29 червня – 1 липня 2014 року. Луцьк, НТІ, 2014. с. 21-22.

[11] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, О. І. Кіянюк, «Експериментальне дослідження несиметрії напруг і струмів приєднання в гуртожитку № 5 ІФНТУНГ», *Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика - 2015»*, 21-24 квітня 2015 р. м. Івано-Франківськ., 2015. с. 204-207.

[12] Я. В. Бацала, «Аналіз генерації реактивної електроенергії сонячними електростанціями», *Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»*. Маріуполь 20-24 квітня 2015 р., 2015. с. 13-14.

[13] М. І. Михайлів, Я. В. Бацала, «Підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів з сонячними електростанціями», *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 19–20 грудня 2014.)* ТНТУ ім. І. Пулюя, Тернопіль, 2014. с. 422.

[14] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, П. О. Курляк, «Експериментальне дослідження роботи однофазної сонячної електростанції в електромережі», *Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. Тез доповідей*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2016. с. 8-9.

[15]. В. С. Костишин, П. О. Курляк, Я. В. Бацала, «Енергетична ефективність складних електротехнічних комплексів», *Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»*. Зб. Тез доповідей. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2016. с. 24-25.

[16] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, О. І. Кіянюк, «Дослідження енергетичних показників та електромагнітної сумісності СЕП з сонячними електростанціями», *VI Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах»*. Луцьк. ЛНТУ, 2016. с. 238-241.

[17] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Експериментальні дослідження електромагнітної сумісності сонячної електростанції з локальною електричною мережею», *XLVI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького НТУ*. Вінниця. 2017. [Електронний ресурс] Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/index/pages/view/zbirn2017>

[18] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Підвищення електромагнітної сумісності однофазних фотоелектричних систем в мережі», *VI Міжнародна науково-технічна конференція "Нафтогазова енергетика 2017"*, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р., 2017. с. 278-289.

[19] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Вплив сонячних електростанцій на низьковольтні розподільні мережі», *V Міжнародна конференція "Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'17"*, Київ, 5-8 червня 2017 р, 2017. с. 14.

## АНОТАЦІЯ

**Бацала Я. В. Підвищення енергоефективності та електромагнітної сумісності електротехнічного комплексу локальної генерації з відновлювальними джерелами енергії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Дисертація присвячена підвищенню енергоефективності сумісної роботи електротехнічного комплексу локальної генерації з відновлювальними джерелами шляхом розроблення моделей, алгоритмів та комп'ютерно-орієнтованого апаратно-програмного комплексу для оцінки ПЯЕ та прогнозування виробленої відновлювальними джерелами енергії, а також дослідження та реалізація оптимальних режимів роботи електротехнічних комплексів з локальними джерелами генерації.

Запропоновано застосування методу прогнозування потужності та кількості генерованої електроенергії ФЕС в умовах Карпатського регіону на основі збору статистичних даних щодо тривалості світлового дня та даних про генерування електроенергії дослідною ФЕС з використанням кривої генерації гармонічною функцією.

Запропоновано підхід, який передбачає використання системи контролю енергетичних параметрів електротехнічних комплексів для отримання фактичних значень вказаних параметрів в точці приєднання джерела генерації електроенергії. Після отримання експериментально вимірених даних та їх цифрової обробки спеціально розробленими програмами в середовищі LabView їх використано, застосувавши удосконалені математичні моделі сумісної роботи ФЕС в електричній мережі.

**Ключові слова:** енергоефективність, електромагнітна сумісність, фотоелектрична станція, локальна генерація, прогнозування, контроль, електричний параметр, система контролю.

## ABSTRACT

**Batsala I. V. The improvement of the energy efficiency and electromagnetic compatibility of the local generation electrotechnical complex equipped with renewable energy sources. – Qualification research paper, manuscript copyright.**

A thesis submitted for the degree of a candidate of technical sciences in the speciality 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The dissertation is devoted of the efficiency improvement of the joint operation of the local generation electrotechnical complex (ETC) equipped with renewable sources, by developing models, algorithms and computer-oriented hardware and software complex for estimation of electricity quality parameters and forecasting of produced renewable energy sources.

The power and the amount of electricity generated by the PVS depends on the duration of the sunny day, the ambient temperature, the angle of inclination of the photocells, solar insolation, the parameters of the electrical grid, respectively, the daily schedule of the PVS generation does not respond to the schedule of electricity consumption in the electrical grid.

The approach, which involves the use of the "research system of control" of the ETC energy parameters for obtaining the actual values of these parameters at the point of connection of the electricity generation source. After obtaining experimentally measured data and their digital processing by specially developed programs in the LabView environment, they can be used by applying improved mathematical models of the joint operation of the PVS in the electrical grid.

The application of the method for forecasting the power and the amount of the electricity generated by the PVS in the conditions of the Carpathian region, based on the collection of statistical data on the duration of daylight and data on the electricity generation by the experimental PVS using the generation curve in the form of the harmonic function, has been proposed. The method allows to determine the power of the PVS generation at a certain time.

The implementation of the proposed approach provides for the possibility of identifying and taking into account the seasonality of the PVS power generation process considering its actual operating conditions during a specific time interval.

A new structure of the research system for controlling of the energy parameters of electrotechnical complexes (ETC) has been proposed and substantiated. This structure, unlike the known structures, allows to analyze the parameters of electromagnetic compatibility (EMC) and components of electric power at the point of connection of the PVS to the electrical grid.

In this paper a new solution of the problem of taking into account a set of regime parameters and indicators of electromagnetic compatibility has been achieved. This solution helps to improve the joint operation of the PVS and the distribution grid and allows reducing the losses caused by low-quality electricity.

The method of determining the voltage levels in the nodes of the distribution network with the PVS, based on a priori information on load parameters, has been further developed, which ensures the operation of the PVS in the electrical grid with allowable voltage deviations.

Advantages of the proposed solution: the improvement of the electromagnetic compatibility of the PVS and the electrical grid (in accordance with the requirements of the standards), taking into account the dynamic change of the parameters of the ETC, has helped to ensure the efficient interoperability of the PVS in the electrical grid with the maximum allowable power quality indicators for the typical day of the season. The improvement of the simulation procedure, in particular the functions of planning the generation level of the PVS and control of its efficiency, has provided an effective tool for detecting the ineffective operation of the PVS in the local power grid for a specific period and its reasons to the owner of the electricity generation source.

**Keywords:** energy efficiency, electromagnetic compatibility, photovoltaic station, local generation, forecasting, control, electrical parameters, system of control.

## АННОТАЦИЯ

**Бацала Я. В. Повышение энергоэффективности и электромагнитной совместимости электротехнического комплекса локальной генерации с возобновляемыми источниками энергии. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Диссертация посвящена повышению энергоэффективности совместной работы электротехнического комплекса локальной генерации с возобновляемыми источниками путем разработки моделей, алгоритмов и компьютерно-ориентированного аппаратно-программного комплекса для оценки ПКЭ и прогнозирования произведенной возобновляемыми источниками энергии, а также исследования и реализация оптимальных режимов работы электротехнического комплекса с локальными источниками генерации.

Предложено применение метода прогнозирования мощности и количества вырабатываемой электроэнергии ФЭС в условиях Карпатского региона на основе сбора статистических данных о продолжительности светового дня и данных о генерировании электроэнергии исследовательской ФЭС с использованием кривой генерации гармоничной функцией.

Предложено использование «исследовательской системы контроля» энергетических параметров электротехнического комплекса для получения фактических значений указанных параметров в точке присоединения источника генерации электроэнергии. После получения экспериментально измеренных данных и их цифровой обработки специально разработанным программ в среде LabView их использовано, применив усовершенствованные математические модели совместной работы ФЭС в электрической сети.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электромагнитная совместимость, фотоэлектрическая станция, локальная генерация, прогнозирования, контроля, электрические параметры, система контроля.



Підписано до друку 19.02.2019 р. Формат 29,7×42 ¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2019-032.  
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.