Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАЦАЛА ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.7

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____Я. В. Бацала

Науковий керівник: Гладь Іван Васильович,
кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківськ - 2018

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». – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

У дисертації поставлена й вирішена актуальна задача підвищення ефективності електротехнічного комплексу (ЕТК) локальної генерації з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) шляхом розроблення моделей, алгоритмів та комп'ютерно-орієнтованого апаратно-програмного комплексу для прогнозування генерації електроенергії фотоелектричними станціями (ФЕС), контролю та аналізу енергетичних параметрів з урахуванням фактичних умов функціонування та допустимими відхиленнями напруги для заданого часового проміжку.

Доведено, що реалізація цього напряму забезпечить можливість виявлення прихованих резервів економії електроенергії, зменшення втрат потужності та підвищення рівня енергоефективності всього електротехнічного комплексу.

На основі аналізу функціонування локальних фотоелектричних та інших джерел відновлювальної енергетики, які вмикаються в енергосистему, чинників, що впливають на показники якості електроенергії (ПЯЕ) та електромагнітну сумісність (ЕМС) обґрунтовано необхідність удосконалення математичних моделей ФЕС в локальних ЕТК, підвищення їх енергоефективності, зокрема, прогнозування генерації, контролю рівня напруг, з урахуванням умов їх функціонування. Одним з шляхів підвищення рівня енергоефективності ФЕС при сумісній роботі з електротехнічним комплексом є застосування сучасних інструментів моделювання та забезпечення енергоефективності, в тому числі, моніторингу ефективності енергоспоживання, контролю заданих показників та

прогнозування рівня генерації згідно вимог стандартів. Оскільки, рівень генерації джерел відновлювальної енергетики, зокрема фотоелектричних станцій залежить від погодно-метеорологічних факторів, а також зміни параметрів електротехнічного комплексу, то необхідним є врахування їх впливу на режим роботи для 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 роботи.

Потужність та величина генерації електроенергії ФЕС залежить від тривалості сонячного дня, температури навколишнього середовища, кута нахилу фотоелементів, сонячної інсоляції, параметрів ЕТК, відповідно добовий графік генерації ФЕС не відповідає графіку споживання електроенергії в енергосистемі. Для формалізації урахування впливу чинників зовнішнього середовища на ефективність ЕТК запропоновано підхід, який передбачає використання «дослідницької системи контролю» (ДСК) енергетичних параметрів для отримання фактичних значень вказаних величин в точці приєднання джерела генерації електроенергії. Після отримання експериментально виміряних даних та їх цифрової обробки спеціально розробленими програмами в середовищі LabView їх можна використати, застосувавши удосконалені математичні моделі сумісної роботи ФЕС в електротехнічному комплексі. 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 у вигляді гармонічної функції, що дозволяє визначати потужність генерації ФЕС в заданий період часу.

Реалізація запропонованого підходу забезпечує можливість виявлення та врахування сезонності процесу генерації електроенергії ФЕС, з урахуванням її фактичних умов роботи протягом конкретного часового інтервалу.

Запропоновано та обґрунтовано нову структуру дослідницької системи контролю енергетичних параметрів електротехнічних комплексів, яка на відміну від відомих дозволяє аналізувати показники електромагнітної сумісності та складові електричної потужності в точці приєднання ФЕС.

В роботі отримано нове вирішення задачі врахування сукупності режимних параметрів та показників електромагнітної сумісності, що сприяє покращенню сумісної роботи ФЕС та електротехнічного комплексу та дозволяє зменшити збитки від неякісної електроенергії.

Отримав подальший розвиток метод визначення рівнів напруг у вузлах розподільної мережі з ФЕС на основі апріорної інформації про параметри навантаження, що дало змогу забезпечити функціонування ФЕС в ЕТК з допустимими відхиленнями напруги.

Переваги запропонованого вирішення задачі: узгодження роботи ФЕС та мережі з допустимими відхиленнями напруги (відповідно до вимог стандартів) з врахуванням динамічної зміни параметрів ЕТК допомогло підвищити електромагнітну сумісність ФЕС в електротехнічному комплексі, з гранично допустимими показниками якості електроенергії, для типового дня відповідного сезону. Удосконалення процедури моделювання, зокрема, функцій планування рівня генерації електроенергії ФЕС та контролю його ефективності надало власнику джерела генерації дієвий інструмент для виявлення фактів неефективної роботи ФЕС в локальній ЕТК протягом конкретного часового періоду, а також причин, що їх зумовлюють.

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 в 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., в ТОВ «Сонце-Покуття» м. Коломия у вигляді методики «Пристрій контролю електромагнітної сумісності та режимних енергетичних параметрів електротехнічних комплексів з фотоелектричними станціями», що підтверджено відповідним актом від 23.05.2018 р. Одержані наукові результати також впроваджені в навчальний процес у ІФНТУНГ на кафедрі “Електропостачання та електрообладнання промислових підприємств” при вивченні дисциплін «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Основи енергоефективності», «Енергозбереження та енергоефективність», «Електрична частина станцій та підстанцій» студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (акт впровадження від 19.03.2018 р.), а також були використані при підготовці наукових звітів з держбюджетних науково-дослідних робіт (акт впровадження від 21.03.2018 р.).

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] І. В. Гладь, І. Д. Галущак, 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. Галущак, 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. Галущак, 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, с. 206-208. 2013.

[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, с. 21-22. 2014.

[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., с. 204-207. 2015.

[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., с. 13-14. 2015.

[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, с. 422. 2014.

[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», с. 8-9. 2016.

[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», с. 24-25. 2016.

[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, с. 238-241. 2016.

[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-технічній конференції "Нафтогазова енергетика 2017"*, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р., с. 278-289. 2017.

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

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». – Ivano Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano Frankivsk, 2018. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

The actual task of the efficiency improvement of the joint operation of the local generation electrotechnical complex (ETC) equipped with renewable sources, in particular the functions of predicting the electricity generation by photovoltaic stations (PVS) and control of the energy parameters of the electrotechnical complex, has been formed and solved in the thesis. This is achieved by taking into account the actual conditions of functioning of the joint operation of photovoltaic stations and the electrical grid caused by the influence of the environmental factors, which provides the possibility of detecting hidden reserves of electricity saving and energy efficiency improvement of the electrotechnical complex.

The need of improvement of the mathematical models of PVS in local grids and improvement of their energy efficiency, in particular prediction of generation and voltage level control, taking into account their actual functioning conditions, has been substantiated by analyzing the functioning of local photovoltaic and other renewable energy sources that are included in the electrical grid and the factors affecting the power quality parameters and the electromagnetic compatibility of their operation with the normed quality indicators. The use of modern modeling tools and providing of energy efficiency, including monitoring of energy consumption efficiency, control of the desired indicators and prediction of the generation level in accordance with requirements of the standards are ways to increase the level of energy efficiency of the PVS during the joint operation in the grid. Since the level of generation by renewable energy sources, in particular photovoltaic power stations, depends on external factors and

changes of the electrical grid parameters, it is necessary to take into account their influence on the mode of operation in seasonal (reflecting the influence of air temperature, solar insolation, wind speed, etc.) and social (reflecting the influence of changes in the way of life on workdays and weekends) factors of the environment during the operation of local generation electrotechnical complexes equipped with 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, has been proposed for the formalization of the consideration of the environmental factors influence on the ETC efficiency. 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 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.

Scientific novelty of the obtained results:

1. A method for predicting the amount of electricity generated by the PVS, using a generation curve in the form of a harmonic function and statistics on the duration of the daylight and the amount of generated electricity by the experimental PVS in the conditions of the Carpathian region, has been developed. This method allows determining the power of the PVS generation at a certain time.

2. The mathematical model of the PVS in the electrical grid, that takes into account a set of regime parameters and indicators of electromagnetic compatibility, has been improved, which reduces losses caused by low-quality electricity and improves the joint operation of the PVS and the distribution grid.

3. The method for determining the voltage levels in the nodes of the distribution grid 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.

4. A new structure of the research system for control of the energy parameters of the ETC has been proposed and substantiated. This structure, unlike the known structures, simplifies the analysis of the EMC energy indicators and the components of electric power at the point of connection of the PVS to the electrical grid.

The practical value of the obtained results:

1. A computer model in Matlab Simulink environment has been developed for the study of voltage levels and EMC indicators of the joint operation of the PVS with the electrical grid in order to determine the maximum generation power in a particular place of connection under the maximum allowable power quality indicators.

2. A method of experimental research of PVS functioning in the existing distribution grids has been proposed, which provides defining of EMC indicators and regime parameters of ETC.

3. A research system for control of EMC and energy parameters of ETC with PVS, which simplifies obtaining information on the actual values of the power quality indicators and EMC at the point of connection of the PVS to the electrical grid, has been developed and implemented.

4. An algorithm and a program, which determine predicted power generation rates per day, month or year by the PVS in the Carpathian region, have been developed based on the results of theoretical studies.

The results of the thesis have been implemented in LLC "STEM Solar" (Ivano-Frankivsk) in the form of "Method for forecasting the regime and energy parameters of electrotechnical complexes with solar power stations by means of models in the Matlab Simulink environment", which is confirmed by the act of March 6, 2018, and in LLC "Sontse-Pokuttia" (Kolomyia) in the form of a method "Device for control of electromagnetic compatibility and regime energy parameters of electrotechnical systems

equipped with photovoltaic power stations", which is confirmed by the act of May 23, 2018.

The scientific results have also been introduced into the educational process at the Department of Electricity Supply and Electrical Equipment of Industrial Enterprises of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUNG) as a part of the disciplines "Alternative and Renewable Energy Sources", "Fundamentals of Energy Efficiency", "Energy Saving and Energy Efficiency", "Electrical part of stations and substations" for the purpose of teaching students in specialty 141 "Electric power supply, electrical engineering and electromechanics" (the act of implementation is dated March 19, 2018). The results of the thesis have also been used for preparation of the scientific reports on the government-funded research projects (the act of implementation is dated March 21, 2018).

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

LIST OF PUBLICATIONS

[1] I. V. Gladj, I. D. Galushchak, A. I. Potochnyi, U. M. Maskevych, I. V. Batsala, O. I. Kiyanyuk, «Problems and principles of designing a universal hardware and software complex for energy inspection of power grids», *Exploration and development of oil and gas fields*, Vol. 3, pp. 83-87. 2008.

[2] I. V. Gladj, O. I. Kiyanyuk, I. V. Batsala, «Analysis of electrical consumption parameters of educational building № 1 of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas», *Oil and gas energy*, Vol. 2, pp. 100-103. 2009.

[3] I. V. Gladj, I. V. Batsala, U. M. Nykolyn, «Analysis of electricity quality indicators of the solar power plant». *Exploration and development of oil and gas fields*, Vol. 4, pp. 81-90. 2013.

[4] I. V. Batsala, I. V. Gladj, O. I. Kiyanyuk, «Improvement of means of control of power parameters of renewable energy sources», *Oil and gas energy*, Vol. 1, pp..52-60. 2015.

[5] M. Y. Fedoriv, I. V. Gladj, I. D. Galushchak, I. V. Batsala, I. M. Mykhayliv, «Increase of reliability and energy efficiency indicators of electric equipment of drilling plants», *Exploration and development of oil and gas fields*, Vol. 3 (60), pp. 64-70. 2016.

[6] M. Y. Fedoriv, I. V. Gladj, I. D. Galushchak, I. V. Batsala, «Increasing reliability and energy efficiency of electrically driven drilling units», *Scientific Bulletin of National Mining University*, Vol. 2, pp. 93-98. 2017.

[7] I. V. Gladj, I. V. Batsala, «Experimental study of low-voltage asymmetric mode for single-phase power generation by solar power plant», *Oil and gas energy*, Vol. 1, pp.123-131. 2017.

[8] I. V. Gladj, I. V. Batsala, «Influence of solar power plants on low voltage distribution networks», *Scientific journal of "Energy: Economics, technology, ecology" Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*, Vol 3 (49), pp. 82-86. 2017.

[9] I. V. Batsala, «Analysis of electricity quality indicators of the solar power plant», on *International Scientific and Technical Conference "Oil and Gas - 2013" October 7-11, 2013 IFNTUOG*. Ivano-Frankivsk, Fakel, pp. 206-208. 2013.

[10] I. V. Gladj, I. V. Batsala, O. I. Kiyanyuk, «Experimental study of power parameters of electrotechnical complexes with application of technologies of virtual devices», on *V International conference. Energy consumption efficiency improvement in electrotechnical apparatus and systems*, Lutsk, Lutsk National Technical University, pp., June 29 - July 1, 2014, pp. 21-22. 2014.

[11] I. V. Gladj, I. V. Batsala, O. I. Kiyanyuk, «Experimental study of asymmetry of stresses and currents of joining in the hostel № 5 IFNTUOG », on *International scientific and technical conference "Oil and Gas Industry - 2015"*. 21-24 April, 2015, in Ivano-Frankivsk, pp.. 204-207. 2015.

[12] I. V. Batsala, «Analysis of the generation of reactive power by solar power plants», on *All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists, specialists, postgraduates. Problems of energy resources saving in electrotechnical systems.*

Science and practice, Mariupol, State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University» April 20-24, 2015, pp. 13-14. 2015.

[13] M. I. Mykhajliv, I. V. Batsala, «Increase of energy efficiency of electrotechnical complexes with solar power plants», on *International reports. Sci.-Tech. conf. Young Scientists and Students "Current issues s of modern technologies" (Ternopil, December 19-20, 2014) of Ternopil Ivan Puluj National Technical*: Book of. Abstracts, Ternopil, pp. 422. 2014.

[14] I. V. Gladj, I. V. Batsala, P. O. Kurlyak, «Experimental study of operation of a single-phase solar power plant in a power grid», on *All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Specialists, Postgraduates "Problems of Energy Conservation in the Industrial Region. Science and Practice»*: Book. tesys reports. Mariupol: State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», pp. 8-9. 2016.

[15] V. S. Kostyshyn, P. O. Kurlyak, I. V. Batsala, «Energy efficiency of complex electrical engineering complexes», on *All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Specialists, Postgraduates "Problems of Energy Conservation in the Industrial Region. Science and Practice»*: Book. tesys reports. Mariupol: State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», pp. 24-25. 2016.

[16] I. V. Gladj, I. V. Batsala, O. I. Kiyanyuk, «Research of energy indices and electromagnetic compatibility of power supply systems with solar power plants», on *VI International conference. Energy consumption efficiency improvement in electrotechnical apparatus and systems*, Lutsk, Lutsk National Technical University, pp. 238-241. 2016.

[17] I. V. Gladj, I. V. Batsala, «Experimental studies of electromagnetic compatibility of a solar power station with an electrical grid», on *IV International scientific and technical conference. Optimal control of electrical units*, Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University, 2017. [Online]. Available: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/index/pages/view/zbirn2017

[18] I. V. Gladj, I. V. Batsala, «Increase of electromagnetic compatibility of single-phase photoelectric systems in the network», on *VI International Scientific and Technical Conference "Oil and Gas Industry 2017"*, Ivano-Frankivsk, May 15-19, 2017, p. 28. 2017.

[19] I. V. Gladj, I. V. Batsala, «Influence of solar power plants on low voltage distribution networks», on *IV International scientific and technical and educational and methodological conference. Energy management: state and development prospects*, Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2017, p. 14. 2017.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 21

ВСТУП 22

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛОКАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ 30

1.1 Об’єкт дослідження.....30

1.2 Сучасний стан і основні шляхи підвищення ефективності функціонування електротехнічних комплексів з фотоелектричними джерелами енергії та їх електромагнітної сумісності в Україні та в світі.....35

1.3 Аналіз сучасних методів моделювання складних технічних систем з фотоелектричними джерелами генерації 44

1.4 Висновки та постановка задач дослідження.....62

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ОБ’ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 65

2.1 Імітаційно-експериментальне моделювання режимів роботи електротехнічних комплексів локальної генерації з відновлювальними джерелами.....65

2.1.1 Обґрунтування основних технічних рішень апаратно-програмного комплексу для вимірювання енергетичних показників системи 65

2.1.2 Структура апаратно-програмного комплексу, алгоритми та методологія аналізу показників якості та електромагнітної сумісності мережі 68

2.2 Розроблення моделі електротехнічних комплексів локальної генерації з фотоелектричними джерелами енергії 84

2.2.1 Обгрунтування моделі ФЕС-електромережа в середовищі *Matlab Simulink*.....84

2.2.2 Аналіз методів визначення параметрів електротехнічних комплексів локальної генерації з фотоелектричними джерелами енергії 91
Висновки до розділу 2.....93
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛОКАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ 95
3.1 Прогнозування кількості згенерованої електроенергії ФЕС, розроблення моделей прогнозу та програм розрахунку.....95
3.2 Експериментальні дослідження енергетичних показників та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів локальної генерації фотоелектричних джерел енергії 112
Висновки до розділу 3.....122
РОЗДІЛ 4 АДАПТАЦІЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЛОКАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ 124
4.1 Дослідження впливу зміни режимних параметрів на ефективність роботи електротехнічних комплексів.....124
4.2 Обґрунтування доцільності застосування методу енергетичних обстежень та аналізу електромагнітної сумісності на локальному електротехнічному комплексі з фотоелектричними джерелами.....129
Висновки до розділу 4.....144
ВИСНОВКИ 145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....147
ДОДАТКИ……163
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи 164
Додаток Б. Технічна характеристика основного технологічного обладнання фотомодуля.....172

Додаток В. Технічна характеристика сенсорів струму та напруги.....174

Додаток Д. Середні значення кількості електроенергії, яку згенерувала ФЕС потужністю 1 кВт в умовах Карпатського регіону за місяць в обраний півгодинний інтервал за добу.....179

Додаток Е. Модель локальної електромережі з сонячною електростанцією в середовищі Matlab Simulink для контролю напруги та режимних параметрів в вузлах приєднання ФЕС.....183

Додаток Ж. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....187

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕТК – електротехнічний комплекс;

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;

ФЕС – фотоелектрична станція;

ПЯЕ – показники якості електроенергії;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ДСК – дослідницька система контролю;

ВЕУ – вітрова електроустановка;

СЕП – система електропостачання;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ТП – трансформаторна підстанція;

АЦП – аналого-цифровий пристрій;

АРПКС – авторегресія проінтегрованого ковзного середнього;

ЛЕП – лінія електропередавання.

ВСТУП

Обгрунтування 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, які проводилися в Україні та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу відновлювальних джерел енергії на показники якості електроенергії дозволить зменшити втрати електроенергії, збільшити термін роботи електричного обладнання, сповільнити старіння ізоляції ліній електропередавання внаслідок вищих гармонік напруги та обмежити нагрівання трансформаторів через несиметрію струмів. Велике значення для аналізу впливу відновлювальних джерел енергії на показники якості електроенергії в системі має місце приєднання та потужність джерела. Згідно з [1] можна виділити три варіанти впливу розподільчої генерації на енергосистему, що 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 покращити рівні напруг у вузлах системи, але необхідно передбачити резерв потужності в системі для покриття дефіциту потужності у випадку раптового їх відімкнення через природні фактори [2].

Зміна амплітуди та характеру потужності в розподільчих електромережах завдяки приєднанню джерел нетрадиційної енергетики зумовлює необхідність розгляду питань аналізу показників якості електроенергії та електромагнітної сумісності, перегляду стандартів стійкості енергетичних систем та поглиблений аналіз цієї проблематики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з науковим напрямом діяльності кафедри «Електропостачання та електрообладнання промислових підприємств» ІФНТУНГ. Тематика роботи є частиною планової науково-дослідної програми з розвитку нафтогазового комплексу України. Наукові результати дисертаційної роботи одержані в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Підвищення енергоефективності та надійності функціонування електротехнічних комплексів нафтової і газової промисловості» (номер державної реєстрації 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 напрямки розвитку науки і техніки».

Автор брав участь у виконанні вищевказаних роботі як виконавець.

Мета і завдання дослідженя. *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 методику 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. Статистичні методи оброблення інформації використано для аналізу результатів розрахунків. Крім того, використано такі методи дослідження: 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 отриманих моделей на адекватність).

Достовірність теоретичних положень підтверджено лабораторними і 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 в 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., в ТОВ «Сонце-Покуття» м. Коломия у вигляді методики «Пристрій контролю електромагнітної сумісності та режимних енергетичних параметрів електротехнічних комплексів з фотоелектричними станціями», що підтверджено відповідним актом від 23.05.2018 р. Одержані наукові результати також впроваджені в навчальний процес у ІФНТУНГ на кафедрі "Електропостачання та електрообладнання промислових підприємств" при вивченні дисциплін «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Основи енергоефективності», «Енергозбереження та енергоефективність», «Електрична частина станцій та підстанцій студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (акт впровадження від 19.03.2018 р.), а також були використані

при підготовці наукових звітів з держбюджетних науково-дослідних робіт (акт впровадження від 21.03.2018 р.)

Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів (додаток А).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: у статті [3] – після експериментальних досліджень на фотоелектричній станції виявлено відхилення показників якості електроенергії від нормованих значень та причини неефективної роботи джерела генерації при заданих параметрах роботи, запропоновано принципи аналізу та опису чинників, що впливають на якість електроенергії; у статті [4] запропоновано шляхи підвищення ефективності сумісної роботи фотоелектричних станцій 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 та проведено аналіз ефективності роботи електрообладнання за допомогою сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (THD); у статті [6] – виконано формулювання принципів застосування інформаційно-вимірювальної системи контролю та математичних моделей для визначення впливу на ефективність роботи електрообладнання з метою вибору оптимального режиму роботи та проаналізовано залежність спектру струму та сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) від режиму роботи електробурів під час роботи та досліджено несиметрію струмів; у статті [7] – експериментально доведено вплив фотоелектричних однофазних джерел генерації з інвертором на електромагнітну сумісність 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

врахування збитків від низької електромагнітної сумісності на прибуток від генерування; у статті [8] запропоновано підвищення ефективності електротехнічного комплексу на основі 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 теоретичних досліджень, що викладені у [3] – [17], були отримані 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» (7-11 жовтня 2013 р. м.Івано-Франківськ,) [9], міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика - 2015» (24 квітня 2015 р. м. Івано-Франківськ), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (20-24 квітня 2015 р. м. Маріуполь) [10], міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (19–20 грудн. 2014, м. Тернопіль) [11], Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (12–14 травня 2016, м. Маріуполь [12, 13], міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (4-6 травня 2016 р. м. Луцьк) [14], XLVI Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького НТУ, (22.03.2017 – 24.03.2017, м. Вінниця) [15], VI Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика 2017", Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. [16], V Міжнародній конференції "Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'17", (5-8 червня 2017 р. Київ) [17], та щорічних науково-технічних семінарах професорсько-викладацького складу кафедри електропостачання та електрообладнання промислових підприємств (2009–2017 р.р.).

Публікації. Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковані у 19 друкованих 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, 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, «Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах», *Технічна електродинаміка*, №1, с. 46 – 51. 2011.

[2] П. Д. Лежнюк, А. О. Ковальчук, В. В. Кулик, «Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії», *Наукові праці ДонНТУ*. № 11(186), с. 250–254. 2011.

[3] Я. В. Бацала, І. В. Гладь, У. М. Николин, «Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції», *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, № 4(49), с. 81-89. 2013.

[4] Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О. І. Кіянюк, «Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлювальних джерел енергії», *Нафтогазова енергетика,* №1, с. 52-60. 2015.

[5] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Експериментальне дослідження несиметричного режиму низьковольтної мережі при однофазному генеруванні електроенергії сонячною електростанцією, *Нафтогазова енергетика*, №1, с. 123-131. 2017.

[6] М. Й. Федорів, І. В. Гладь, І. Д. Галущак, Я. В. Бацала, «Підвищення надійності та енергоефективності електропривідних бурильних установок», *Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ*, №2, с. 93-98. 2017.

[7] І. В. Гладь, І. Д. Галущак, А. І. Поточний та ін., «Проблеми та принципи проектування універсального апаратно-програмного комплексу для енергетичних обстежень електромереж», *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ,* № 3. с. 83-87. 2008.

[8] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Вплив сонячних електростанцій на низьковольтні розподільні мережі», *Енергетика: економіка, технології, екологія. Київ. КПІ ім. Сікорського*. № 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, с. 206 - 208. 2013.

[10] 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., с. 13 - 14. 2015.

[11] М. І. Михайлів, Я. В. Бацала, «Підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів з сонячними електростанціями», *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»,* м. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, 19–20 грудня 2014 р., Збірник тез доповідей, с. 422. 2014.

[12] 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», с. 8 - 9. 2016.

[13] 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», с. 24 - 25. 2016.

[14] 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, с.238-241. 2016.

[15] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Експериментальні дослідження електромагнітної сумісності сонячної електростанції з локальною електромережею», *XLVI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького НТУ*. Вінниця. 22.03.2017 – 24.03.2017. [Електронний ресурс]. Доступно: http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/17026/2966.pdf?sequence=3

[16] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Підвищення електромагнітної сумісності однофазних фотоелектричних систем в мережі», *VI Міжнародна науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика 2017"*, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. с. 28. [Електронний ресурс]. Доступно: https://nung.edu.ua/files/files/event/program-2017_pp_v3.pdf

[17] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Вплив сонячних електростанцій на низьковольтні розподільні мережі», *Енергетика: економіка, технології, екологія.* Київ. КПІ ім. Сікорського, № 3 (49), с. 82-86. 2017.

[18] *Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Жовтень 2011 року.* с. 1 - 42. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/Wind_and_Solar_PV_Tech_Req__Final__Version_Ukrainian.pdf

[19] *ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения Совместимость технических средств электромагнитная»*, Стандартинформ, 2013.

[20] *Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards. Online source, date accessed 5th January, 2014.* [Online]. Available: www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/IEC.pdf

[21] *IEC TR 61000-3-6: EMC limits. Limitation of emissions of harmonic currents for equipment connected to medium and high voltage power supply systems.* [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/

[22] *IEC TR 61000-3-7: EMC-limits. Limitation of voltage fluctuations and flicker for equipment connected to medium and high voltage power supply systems.* [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/

[23] *IEC 61400-21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.* [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/

[24] *ДСТУ EN 50160:2008. Характеристики напруги електропостачання у розподільчих мережах загальної призначеності.* [Електронний ресурс]. Доступно: https://nerc.gov.ua/

[25] *ДСТУ EN 50160:2008. EN501060 «Voltage Characteristics in Public Distribution Systems». Характеристики напруги електропостачання у розподільчих мережах загальної призначення.* [Електронний ресурс]. Доступно: https://nerc.gov.ua/

[26] *Fronius International* [Online]. Available: http://www.fronius.com.

[27] *Solar Power World. Direct. Solar Data Loggers.* November 5, 2013. [Online]. Available: http://www.solarpowerworldonline.com/2013/11/

[28] Д. Г. Деревянко, «Особливості оцінки запасу стійкості локальних систем з різнорідними джерелами генерації», *Енергетика: економіка, технології, екологія. Спецвипуск.* с. 15 – 18. 2013.

[29] Jian Sun, «Power Quality in Renewable Energy Systems. Challenges and Opportunities» *IEEE Workshop Control Model. Power Electron.*, Aug. 2008, pp. 1- 10 c. 2008.

[30] Arvind Simhadri, «Impact of Distributed Generation of Solar Photovoltaic (PV) Generation on the Massachusetts Transmission System», *Master of Business Administration in conjunction with the Leaders for Global Operations Program at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY*, с. 1 - 76. 2015.

[31] Sven Teske, «Bridging the Gap between Energy- and Grid Models Developing an integrated infrastructural planning model for 100% renewable energy systems in order to optimize the interaction of flexible power generation, smart grids and storage technologies», *Thesis University of Flensburg,* June 2015. Dipl.-Ing., pp. 1-221. 2015.

[32] Srete N., Nikolovski, Predrag Ž., Marić, Ljubomir V., Majdandžić, «Integration of Solar Power Plant in Distribution Network», *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE),* с. 658–668. 2015.

[33] Э. А. Бекиров, И. В. Романовский, «Анализ качества электрической энергии, генерируемой солнечной электростанцией в энергосистему», *Строительство и техногенная безопасность*, Выпуск 40, с. 106 - 115. 2011.

[34] С. П. Денисюк, Т. М. Базюк, «Оптимальний відбір потужності в системах еелектропостачання», *Енергетика: економіка, технології, екологія.* №2, с. 50 – 58. 2013.

[35] О. С. Яндульський, О. В. Хоменко, А. А. Марченко, «Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій на режими роботи електричної мережі», *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка та електроенергетика»,* №1(14), Донецьк, ДНТУ, с. 324-329. 2013.

[36] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук, «Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6. с. 45 – 47. 2013.

[37] С. П. Денисюк, Д. Г. Деревянко, К. Ю. Щербань «Особливості аналізу впливу завад від різнотипних джерел роззосередженої генерації на процеси в навантаженнях», *Журнал інженерних наук.* Том 1, №2, с.В1-В7. 2014.

[38] В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, Ю. В. Малогулко, «Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та систем

централізованого електропостачання», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, №25, с. 113 - 120. 2014.

[39] В. Г. Кузнєцов, О. Г. Шполянський, Н. А. Яремчук , «Узагальний показник якості в електричних мережах», *Технічна термодинаміка*. № 3, с. 46-52. 2011.

[40] Э. А. Бекиров, «Анализ энергетических параметров систем электроснабжения при использовании возобновляемых источников энергии, *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, №8 (114), с. 230 -237 с. 2013.

[41] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, Є. С. Дідіченко, «Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед», *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*, № 1 (6), с. 27-31. 2017.

[42] С. С. Сиромаха, Д. С. Осипов, В. Т. Черемисин, «О необходимости учета режима роботы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов», *Современные проблемы науки и образования*, № 5. 2014. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15252

[43] Ernauli Christine Aprilia; J.F.G. Cobben, P.F. Ribeiro, V. Cuk, «Modelling of photovoltaic (PV) inverter for power quality studies», *Publisher, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven*, 2012. [Online]. Available: http://repository.tue.nl/783903

[44] *Solar Power World. Direct. Solar Data Loggers.* November 5, 2013. [Online]. Available: http://www.solarpowerworldonline.com/2013/11/

[45] *Wireless Solar Monitoring Starter Kit - National Instruments.* [Online]. Available: http://www.ni.com/example/31452/en/

[46] О. В. Соломчак, І. В. Гладь, «Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним (нелінійним) навантаженням», *Енергетика та електрифікація*, № 6. с. 27-32. 2008.

[47] Heinrich Habelin, «Wirkungsgrade von Photovoltaik –Wechselrichtern. Totaler Wirkungsgrad und Dinamischer MPPT von Photovoltaik». – p. 5. 2010.

[48] *Mathworks. Simulation of photovoltaic/hydro hybrid electric power system utility designed by Indraneel Saki*. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34752-grid-connected-pv-array

[49] W.Bower and M.Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive power systems", *Report IAE PVPS T5-09*, March 2002.

[50] Ćuk, V., Bhattacharyya, S., Cobben, J. F. G., Kling, W. L., Timens, R. B., & Leferink, F. B. J., «The effect of inrush transients on PV inverter's grid impedance measurement based on inter-harmonic injection», *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2010)*, Granada, Spain: EA4EPQ, pp. 1-6. 2010.

[51] *Berner Fachhochschulehaute ecole specialisee bernoise Bern University of Apllied Science.* [Online]. http://www.pvtest.ch/

[52] Д. Г. Деревянко, К. Ю. Суменко, В. Г. Процько, «Аналіз особливостей забезпечення стійкості та надійності систем з інтеграцією джерел розосередженої генерації, *Сталий розвиток енергетики*, №4, с. 433-439. 2013.

[53] Э. А Бекиров, Д. Б. Бонев, А. П. Химич, Н. А. Долгова, «Переходные процессы в системах электропитания с фотоэлектрическими преобразователями и аккумуляторами», *Строительство и техногенная безопасность*, №32. с. 168-179. 2010.

[54] В. В. Кулик, В. М. Пірняк, «Оптимізація перетікань реактивної енергії в розподільних електричних мережах з використанням принципу найменшої дії», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 71-79. 2017.

[55] Liu, D., Xu, Y., Wei, Q., & Liu, X.. «Residential energy scheduling for variable weather solar energy based on adaptive dynamic programming», *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,* №5(1), pp. 36-46. 2018.

[56] Wang, F., Zhen, Z., Wang, B., & Mi, Z., «Comparative Study on KNN and SVM Based Weather Classification Models for Day Ahead Short Term Solar PV Power Forecasting», *Applied Sciences*, №8(1), p. 28. 2017.

[57] Das, U. K., Tey, K. S., Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Idris, M. Y. I., Van Deventer, W. & Stojcevski, A, «Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, № 81, pp. 912-928. 2018.

[58] Yousef Elmabruk Saad El-Rayan, «Impact Analysys Models of Renewable Energy Uncertainty on Distribution Networks», *A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Waterloo, Ontario, Canada*, p. 128. 2012.

[59] В. В. Козирський, Л. В. Мартинюк, «Інтенсивність сонячного випромінювання, спрямованого на похилу поверхню», *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. . Серія : Техніка та енергетика АПК*, № 174(1). - с. 112-119. 2012.

[60] Б. І. Мокін, Б. В. Мокін, О. Б. Мокін, «Математичні моделі ідентифікації електромеханічних процесів», *Навчальний посібник,* Вінниця, УНІВЕРСУМ, - с. 300. 2005.

[61] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, «Методологія та організація наукових досліджень», *Навчальний посібник,* Вінниця, ВНТУ, 2014.

[62] Б. І. Мокін, Б. В. Мокін, О. Б. Мокін, «Методологія та організація наукових досліджень», *Практикум для самостійної роботи студентів з навчальної*

дисципліни «Методологія та організація наукових досліджень». Частина 1: від постановки задачі до синтезу та ідентифікації математичної моделі , Вінниця, ВНТУ, - с 179, 2018.

[63] С. І. Доценко, С. О. Тимчук, С. О. Шендрик, О. В. Шулима, «Розрахунок потужності інсоляції для прогнозування виробництва електричної енергії фотоелектричними панелями», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки.* Випуск 176 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, с. 8-11, 2016.

[64] Сонячна інсоляція в світі. [Електронний ресурс]. Доступно: http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html

[65] Ю. В. Малогулко, «Оптимізація функціонування відновлювальних джерел енергії в локальних електричних системах», *Дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі та системи»*, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. 2015.

[66] Г. Г. Пивняк, И. В. Жежеленко, Ю. А. Папаика, «Расчеты показателей электромагнитной совместимости», *Учеб. пособие*. М-вообразования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. НГУ, 2014.

[67] Ю. В. Грицюк, І. В. Грицюк, А. П. Здолбіцький, «Вплив специфічних живлячих напруг на ефективність роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності», *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. №16-17, с. 77 – 83. 2014.

[68] В. В. Кулик, Ю. В. Грицюк, І. В. Грицюк, «Оптимальне керування потоками реактивної потужності в розподільних електромережах з розосередженим генеруванням», *Праці інституту електродинаміки НАН України.* Київ, НТУ КПІ, № 36. – с. 216 – 221. 2013.

[69] Ю. В. Грицюк, І. В. Грицюк, І. О. Бандура, «Імітаційне моделювання впливу відновлюваних джерел енергії на параметри режиму розподільних

електричних мереж», *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»,* № 56, - с. 61-65. 2016.

[70] Ю. В. Грицюк, І. В. Грицюк, І. О. Бандура, «Особливості компенсації реактивних навантажень в електричних мережах з розосередженим генеруванням», *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»,* № 56, - с. 55-60. 2016.

[71] В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Нікітчук, В. М. Світко, «Автоматизація теплового стану електрообладнання», Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 3, - с. 51-56. 2018.

[72] В. М. Кутін, М. В. Кутіна, «Математична модель визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж постійного струму та її аналіз», *Вісник Криворізького національного університету*. № 42. – с. 65-68. 2016.

[73] В. М. Кутін, М. В. Кутіна, «Вдосконалення методу визначення залишкового ресурсу силового електрообладнання підстанцій високої напруги в умовах експлуатації», *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 14-23 березня 2018 р., с. 3131-3132, 2018.

[74] В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, «Визначення умов роботоздатності розподільних мереж», *Монографія.* Вінниця, ВНТУ, - 148 с., 2015.

[75] В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна, «Діагностика електрообладнання», *Навчальний посібник*, Вінниця : ВНТУ, 2014. — 161 с.

[76] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, «Використання в SMART GRID технологіях принципу найменшої дії як механізму природної оптимізації», *Технічна електродинаміка*, № 4. С.32-34. 2014.

[77] С. М. Левицький, «Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції», *Електротехніка та електромеханіка. Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка*, №5, - с. 26-29, 2015.

[78] *WATTrouter*. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.wattrouter.ru/

[79] М. П. Розводюк, О. М. Янчук, «Віртуальний тренажерний комплекс для дослідження системи електропривода ТП-Д», Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Inżynieria i technologia. Aktualne naukowe problemy. Rozpatrzenie, decyzja, praktyka", 30.03.2016 – 31.03.2016, Гданьск Gdańsk. – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», S.50-54. 2016.

[80] 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. с. 204-207. 2015.

[81] І. В. Гладь, Я. В. Бацала, «Методики прогнозування режимних та енергетичних параметрів фотоелектричих систем», *Методичні вказівки для самостійної роботи студентів з дисципліни «Електрообладнання сонячних електростанцій»*, ІФНТУНГ. - 21 с. 2018.

[82] J. FLICKER, Jay JOHNSON, «Photovoltaic ground fault and blind spot electrical simulations», *Sandia National Laboratories*, 2013. [Online]. Available: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/Flicker-PVSC-Cap-Paper-Final.pdf

[83] Javier DE LA CRUZ, Pedro GÓMEZ, «Real problems in utility high voltage network due to grid connected photovoltaic power generation. The experience of Endesa»,*Proc. 2010 International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain*. p. 1-6. 2010. [Online]. Available: http://icrepq.com/icrepq'10/375-De-La-Cruz.pdf

[84] PIELAHN, M., et al., «Efficient EMT modeling approach to studying resonance phenomenon in PV and wind energy systems», *International Conference on Power Systems Transients*. 2015. [Online]. Available: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2015/15IPST228.pdf

[85] Г. А. Сендерович; А. В. Дяченко, «Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения», № 2. *Электротехника и электромеханика*, с. 2. 2016.

[86] Jack Flicker, Robert Kaplar, Matthew Marinella, and Jennifer Granata, «PV inverter performance and reliability: What is the role of the bus capacitor", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Volume 2, IEEE, 38th, pages 1–3. 2012.

[87] Д. Г. Дерев'янко, «Оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів в локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації», *Дис. канд. техн. наук. : 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.* Київ, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18276

[88] 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*, № 2. с. 100-103. 2009.

[89] Н. В. Давиденко, «Моніторинг ефективності електроспоживання насосних станцій системи комунального водопостачання з урахуванням чинників зовнішнього середовища», *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи».* – Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2017. - Вінницький національний технічний університет, Вінниця. 2017.

[90] В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги», *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»,* Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2017.

[91] *System Advisor Model (SAM).* [Online]. Available: https://sam.nrel.gov/

[92] *Mathworks. Grid-Connected PV Array.* [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34752-grid-connected-pv-array

[93] О. П. Чорний, А. А. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю, Сисюк, О. В. Садовой, «Моделювання електромеханічних систем», *Підручник*, Кременчук, 410 с. 2001.

[94] R.Ramaprabha, Mathur, «Intelligent Controller based Maximum Power Point Tracking for Solar PV System*», International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*. Volume 12– No.10, January 2011.

[95] Ananth, G. V. Nagesh Kumar, «Design of Solar PV Cell Based Inverter for Unbalanced and Distorted Industrial Loads», *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI).* Vol. 3, No. 2, June 2015, pp. 70-77. 2015.

[96] Charles J. Mozina, «Impact of Green Power Generation on Distribution Systems», *RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE.* Fort Collins, CO, USA.– pp. 1-21. 2009.

[97] Braun, M., et al, "Optimal reactive power supply in distribution networks-technological and economic assessment for PV-systems." *European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2009),* Hamburg (Germany). 2009.

[98] Nasser Kutkut, Petra, «Solar An AC PV Module with Reactive Power Capability», *Need and Benefit.* – p. 8. 2011.

[99] Atia, Yousry, Mohamed Zahran, and Abdullah Al-Hossain, "Solar cell curves measurement based on LabVIEW microcontroller interfacing." *Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Automatic Control Modeling & Simulation.* pp. 59-64. 2010.

[100] Carotenuto, Pietro Luigi, "Grid impedance estimation in PV grid-connected systems through PQ variation methods. A Simulink-based approach." *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona - Enginyeria*

Electrònica, 2011. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12669

[101] D. B. Raut, Amber Bhattrai, «Performance analysis of grid connected solar PV system using MATLAB/simulink», *Rentech Symp Compend September*, Vol. 3, pp. 48-54. 2013.

[102] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, H. Zayandehroodi, "Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks», *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 208-213. 2013.

[103] J. Saloman, T. S. Sirish, «Performance analysis of grid connected solar photo-voltaic system under grid abnormal conditions. In Signal Processing, Communication, Power and Embedded System», *International Conference on IEEE*. pp. 1653-1659, 2016.

[104] Z. Ahmad, S. N. Singh, «Modeling and Control of Grid Connected Photovoltaic System-A Review», *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, № 3(3), pp. 2250-2459. 2013.

[105] Z. Liu, X. Xu, H. A. Abdelsalam, E. Makram, «Power System Harmonics Study for Unbalanced Microgrid System with PV Sources and Nonlinear Loads», *Journal of Power and Energy Engineering*, № 3(05), pp. 43. 2015.

[106] A. A. Latheef, «Harmonic impact of photovoltaic inverter systems on low and medium voltage distribution systems», *Thesis, School of Electrical, Computer and Telecomunications Engineering*, University of Wollongong, pp. 175. 2006.

[107] G. Sekar, T. Anita, «Design and Implementation of Solar PV for Power Quality Enhancement in Three-Phase Four-Wire Distribution System», *Journal of Electrical Engineering and Technology*, № 10. pp. 75-82. 2015,

[108] M. Sidrach-de-Cardona, J. Carretero, «Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, № 87(1-4), pp. 529-540. 2015.

[109] M. P. Comech, M. García-Gracia, S. Borroy, M. T. Villén, «Protection in Distributed Generation», *Distributed Generation, D. N. Gaonkar*, Olajnica, Vukovar, Croatia, pp. 289-310, 2010.

[110] Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, Є. В. Бараненко, «Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік», *Електрифікація транспорту*. № 3. с. 78-83. 2012.

[111] И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский,Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, Н. А. Нойбергер, «Электромагнитная совместимость потребителей», *Машиностроение,* 2012.

[112] *Toolbox-Curve Fitting Tool-MATLAB.* [Online]. Available: http://www.mathworks.com/products/

[113] 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. –с. 21-22. 2014.

[114] С. П. Денисюк, Д. С. Горенко, «Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій», *Енергетика: економіка, технології, екологія*. №2. с. 25 – 33. 2016.

[115] Д. И. Родькин, «Решение одного класса некоректных электротехнических задач энергетическим методом», *Електротехнічні системи, методи оптимізації, та моделювання*. №1 (21), с. 69 – 80. 2013.

[116] Babita Nanda, Balasriram Kodi, «Management of Power in AC/DC Hybrid Microgrid and its Harmonic Analysis by D-STATCON», *International Journal of Science and Research (IJSR),* pp. 315 – 320. 2017.

[117] Mokhtar Aly; Emad M. Ahmed; Masahito Shoyama, «Thermal and Reliability Assessment for Wind Energy Systems With DSTATCOM Functionality in Resilient Microgrids». [Online]. Available: http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/.

[118] Fei Mei, Yi Pan, Kedong Zhu, Jianjong Zhend, «A Hybryd Online Forecasting Model for Ultrashort-Term Photovoltaic Power Generation», *Sustainability, 10, 820,* pp. 1-17. 2018.

[119] О. О. Закладний, О. М. Закладний, «Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем шахтних стаціонарних установок», *Монографія*: Київ, видавництво «Лібра», с. 187. 2013.