

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГРИЩУК МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 621.311

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ**  
**ТРАНСФОРМАТОРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З**  
**ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

М. О. Грищук

Науковий керівник:

Рубаненко Олександр Євгенійович,  
кандидат технічних наук, професор

Вінниця – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Гришук М. О.* Методи та засоби діагностування силових трансформаторів розподільних електричних мереж з фотоелектричними станціями. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 – Електрична інженерія). – Вінницький національний технічний університет МОН України, Вінниця, 2020.

Силовий трансформатор (СТ) займає важливе місце в електричних системах, в яких експлуатуються розподільні електричні мережі та фотоелектричні станції. Такій електричній машині варто приділяти увагу під час її експлуатації, оскільки його вихід з ладу може призвести до суттєвих проблем для електроенергетичного підприємства. Особливо актуальним постало питання з розвитком "зеленої" енергетики в Україні. Адже такі об'єкти є умовно керованими, що призводить до частої зміни режиму роботи як для підприємств, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел так і для розподільних мереж загалом.

Одним з найкращих підходів для діагностування силових трансформаторів нині є аналіз частотної реакції (FRA) під час випробування трансформатора. Однак використання такого методу ускладнюється відсутністю нормативних документів, які регламентують його застосування на території України в повному обсязі, а інтерпретація отриманих результатів часто залишається загадкою для обслуговуючих підприємств.

У роботі запропоновано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі покращення якості експлуатації силових трансформаторів за рахунок їх комплексного діагностування в розподільних електричних мережах по яких передається електрична енергія від фотоелектричних станцій до споживачів.

Розроблено та вдосконалено методи діагностування силових трансформаторів розподільних електричних мереж з фотоелектричними

станціями покращує якість їх функціонування за рахунок виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку, дозволяє покращити енергоефективність таких станцій і мереж шляхом вчасних ремонтів та зменшення аварій.

Аналіз особливостей парку силових трансформаторів розподільних електричних мереж, що експлуатуються в Україні, вказує на відпрацювання більшістю з них, паспортного ресурсу та на те, що частими причинами виведення силових трансформаторів з експлуатації є зростання кількості фотоелектричних станцій та генерованої ними електричної енергії, пошкодження обмоток та магнітопроводу.

Запронована класифікація існуючих методів та засобів діагностування силових трансформаторів свідчить про те що на відміну від інших методів аналіз амплітудно-частотних характеристик дозволяє виявляти різні дефекти (деформації та зсуви обмоток, пошкодження магнітопроводів, погіршення ізоляції, погіршенні контактів).

Структурна схема мікропроцесорного приладу комплексного діагностування трансформатора дозволяє розробити електричну принципову схему цього приладу комплексне вимірювання контрольованих параметрів СТ.

Розрахунок помилок діагностування силового трансформатора першого та другого роду дозволяє оцінити якість запропонованих в роботі методів та обґрунтувати доцільність їх застосування.

Розроблені алгоритми та програмне забезпечення призначені покращити якість визначення технічного стану силових трансформаторів 6-35 кВ, під час їх обстеження.

Розроблено програмне забезпечення для виявлення дефекту СТ за результатами аналізу його АЧХ та для визначення діапазону частот на АЧХ з понаднормованим відхиленням.

Так, у першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз електроенергетичного комплексу України, який дозволив сформулювати висновки щодо доцільності проведення дослідження. Виконано аналіз парку силових трансформаторів та їх конструктивних особливостей, що дозволило прийняти

рішення щодо досліджуваних СТ, сформувавши обмеження та припущення в роботі. Визначено, що одним із ключовими елементами, електричних мереж (ЕМ), є СТ 35-0,4 кВ. Велика їх кількість, експлуатуються в Україні, тому прийнято рішення в подальшому досліджувати саме цей клас СТ. Проведений аналіз комп'ютерної моделі фрагменту розподільної мережі, показав, що СТ, часто перебувають у передаварійних режимах, а СТ, які експлуатуються на ФЕС, також зазнають значних впливів під час частих комутаційних режимів. Так, наступним кроком проведено дослідження пошкоджуваності СТ, які показали, що як в Україні, так і за кордоном, СТ продовжують пошкоджуватись, незважаючи на різноманіття існуючих методів та засобів діагностування. Визначено показники надійності ЕМ, та показники, що характеризують стан СТ. Дослідження дозволять сформувавши методи та засоби діагностування, що дозволяють визначити технічний стан СТ.

У другому розділі дослідження виконано аналіз існуючих методів діагностування СТ, що описані в нормативній літературі. Розглянуто основні методи, якими часто користуються в Україні, з метою визначення технічного стану СТ. Наведено дослідження алгоритму, що дозволяє визначити готовність СТ до експлуатації. Визначено, що нині, методи амплітудно-частотного діагностування, є відносно новими, особливо в Україні; Проведено аналіз таких методів. Проведено аналіз впливу методів частотного діагностування на виявлення дефектів СТ, під час визначення його технічного стану. Проведений аналіз методів діагностування, дозволив узагальнити методи та класифікувати їх, що в подальшому дозволить раціонально визначити необхідні інструменти, для визначення стану СТ під час його експлуатації.

Третій розділ дисертаційного дослідження присвячено розробленню нових та вдосконаленню існуючих методів та засобів діагностування. Так, за результатами дослідження отримав подальший розвиток метод визначення оптимальної послідовності випробувань СТ. Такий метод дозволить врахувати результати огляду СТ, що експлуатуються на ФЕС, оперативним персоналом, який шляхом врахування результату зовнішніх проявів дефекту, дозволяє

вибрати оптимальну послідовність контролю та зменшити час на виявлення та обґрунтування можливого дефекту на ранній стадії його розвитку. Наведено алгоритм запропонованого методу визначення оптимальної кількості випробувань, який шляхом врахування похибок FRAnalyzer та використання D-оптимальних планів, дозволяє зменшити помилки першого та другого роду під час визначення технічного стану СТ, що знаходяться в експлуатації. Показано алгоритм, який дозволяє визначити дату проведення наступної перевірки СТ, що на основі попередньо проведеного діагностування, дозволить забезпечити повний контроль технічного стану силового трансформатора.

В четвертому розділі дисертаційного дослідження описано розроблений алгоритм проведення комплексного діагностування, що дає змогу виявити пошкодження навіть на ранній стадії їх розвитку. Запропонований підхід дозволяє оптимізувати послідовність виконання дій під час діагностування СТ, за рахунок чого проведені дослідження дадуть змогу сформулювати більш точні дані щодо стану СТ. Запропоновано структурну схему мікропроцесорного пристрою, що забезпечить комплексний підхід до вимірювання контрольованих параметрів СТ, а також програмне забезпечення інтерпретації отриманих результатів під час опрацювання вимірюваних параметрів СТ.

**Наукова новизна отриманих результатів**, що виносяться на захист, полягає у тому, що:

1. Вперше розроблений метод пошуку дефектів силових трансформаторів шляхом порівняння амплітудно-частотних характеристик, який за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонованих за результатами виявлених відхилень цих характеристик дозволяє підтвердити, або спростувати визначений дефект;

2. Отримав подальший розвиток метод визначення технічного стану силового трансформатора, який шляхом врахування похибок вимірювальних приладів та використання D-оптимальних планів дозволяє визначити кількість повторних вимірювань амплітудно-частотних характеристик, що дає можливість зменшити помилки діагностування першого та другого роду.

3. Отримав подальший розвиток метод визначення оптимальної послідовності випробувань силового трансформатора в залежності від зміни результатів його огляду оперативним персоналом, який шляхом врахування результату зовнішніх проявів дефекту, дозволяє вибрати оптимальну послідовність контролю та зменшити час на виявлення та обґрунтування можливого дефекту на ранній стадії його розвитку.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено алгоритми визначення технічного стану силового трансформатора 6-35 кВ під час конкретного обстеження.

2. Розроблено програмне забезпечення визначення оптимальної кількості вимірювань, під час діагностування силових трансформаторів 10-35 кВ з використанням методу аналізу амплітудно-частотних характеристик.

3. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час викладання дисциплін «Комп'ютерні системи діагностики електричного обладнання»; в «АК Вінницяобленерго», в ТОВ «Українські технологічні продукти», в Департаменті електричних підстанцій Південно-Західної електроенергетичної системи.

*Ключові слова:* діагностування, пошкодження, силовий трансформатор, частотний аналіз, обмотки, планування, експеримент, фотоелектрична станція.

## ABSTRACT

*Hryshchuk M.* Methods and tools for diagnosing power transformers of electrical distribution networks with photovoltaic stations. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the direction of preparation 141 - "Electric power, electric engineering and electromechanics" on a specialty 14 - "Electrical engineering" - Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, 2020.

Power transformer (PT) occupies an important place in electrical systems in which distribution networks and photovoltaic stations are operated. Such an electric machine should be considered during its operation, as its failure can lead to serious problems for the power company. The issue of the development of "green" energy in Ukraine has become especially relevant. After all, such facilities are conditionally controlled, which leads to frequent changes in the mode of operation of the enterprise that produces electricity from alternative sources and for distribution networks in general.

One of the best approaches for diagnosing power transformers today is frequency response analysis (FRA) during transformer testing. However, the use of such a method is complicated by the lack of regulations governing its application in Ukraine in full, and the interpretation of the results often remains a mystery to service companies.

The paper proposes a new solution to the current scientific and applied problem of improving the quality of operation of power transformers through their comprehensive diagnosis in the electrical distribution networks through which electricity is transmitted from photovoltaic plants to consumers.

Development and improvement of methods for diagnosing power transformers of distribution electric networks with photovoltaic stations improves the quality of their operation by detecting defects at an early stage of their development, improves energy efficiency of such stations and networks by timely repairs and reduction of accidents.

Analysis of the peculiarities of the fleet of power transformers of distribution

electric networks operated in Ukraine indicates the development of most of them, the passport resource and that frequent reasons for decommissioning of power transformers are an increase in the number of photovoltaic stations and electricity generated, damage to windings and magneto .

The proposed classification of existing methods and means of diagnosing power transformers shows that, unlike other methods, the analysis of amplitude-frequency characteristics allows to detect various defects (deformations and shifts of windings, damage to magnetic circuits, insulation deterioration, contact deterioration).

The block diagram of the microprocessor device of complex diagnostics of the transformer allows to develop the electric schematic scheme of this device of complex measurement of the controlled parameters of Power Transformer.

The calculation of errors in diagnosing the power transformer of the first and second kind allows us to assess the quality of the proposed methods and justify their feasibility.

The developed algorithms and software are designed to improve the quality of determining the technical condition of 6-35 kV power transformers during their inspection.

Software has been developed to detect a PT defect based on the results of its frequency response analysis and to determine the frequency range at the frequency response with excessive deviation.

Thus, in the first section of the dissertation the analysis of the electric power complex of Ukraine is made, which allowed to form conclusions about the expediency of the research. The analysis of the fleet of power transformers and their design features was performed, which allowed to make decisions about the studied PT, to form limitations and assumptions in the work. It is determined that one of the key elements of electrical grids (EG) is 35-0.4 kV. A large number of them are operated in Ukraine, so it was decided to further study this class of ST. The analysis of the computer model of the fragment of the distribution network showed that the PTs are often in pre-emergency modes, and the PTs operated at the PES (Photo Elektrical Station) are also significantly affected during frequent switching modes. Thus, the next step was a study



of PT damage, which showed that both in Ukraine and abroad, PT continues to be damaged, despite the variety of existing methods and means of diagnosis. EG reliability indicators and indicators characterizing the state of PT are determined. Research will allow to form methods and means of diagnosis that allow to determine the technical condition of PT.

The second section of the study analyzes the existing methods of diagnosing PT, which are described in the normative literature. The main methods often used in Ukraine are considered in order to determine the technical condition of PT. The research of the algorithm which allows to define readiness of PT for operation is resulted. It is determined that today, the methods of amplitude-frequency diagnosis are relatively new, especially in Ukraine; The analysis of such methods is carried out. The analysis of the influence of frequency diagnostic methods on the detection of PT defects during the determination of its technical condition is carried out. The analysis of diagnostic methods allowed to generalize the methods and classify them, which in the future will rationally determine the necessary tools to determine the state of PT during its operation.

The third section of the dissertation research is devoted to the development of new and improvement of existing methods and means of diagnosis. Thus, according to the results of the study, the method of determining the optimal sequence of PT tests was further developed. This method will take into account the results of inspection of PT operated at the PES, operational staff, which by taking into account the results of external manifestations of the defect, allows you to choose the optimal sequence of control and reduce the time to identify and justify a possible defect at an early stage. The algorithm of the proposed method for determining the optimal number of tests, which by taking into account the errors of FRAnalyzer and the use of D-optimal plans, allows to reduce errors of the first and second kind when determining the technical condition of PT in operation. An algorithm is shown that allows to determine the date of the next inspection of the PT, which on the basis of pre-diagnosis, will provide full control of the technical condition of the power transformer.

The fourth section of the dissertation research describes the developed algorithm

for complex diagnosis, which allows to detect damage even at an early stage of their development. The proposed approach allows to optimize the sequence of actions during the diagnosis of PT, due to which the research will allow to generate more accurate data on the state of PT. The structural scheme of the microprocessor device which will provide the complex approach to measurement of the controlled parameters of PT, and also the software of interpretation of the received results during processing of the measured parameters of PT is offered.

**The scientific novelty of the obtained results, which are submitted for defense, is that:**

1. For the first time a method of searching for defects of power transformers by comparing amplitude-frequency characteristics, which by controlling additional diagnostic parameters proposed by the results of detected deviations of these characteristics allows to confirm or refute the identified defect;

2. The method of determining the technical condition of the power transformer was further developed, which by taking into account the errors of measuring instruments and the use of D-optimal plans allows to determine the number of repeated measurements of amplitude-frequency characteristics, which reduces diagnostic errors of the first and second kind.

3. The method of determining the optimal sequence of tests of the power transformer depending on the change of the results of its inspection by operational personnel, which by taking into account the result of external manifestations of the defect, allows to choose the optimal sequence of control and reduce the time to detect and justify a possible defect at an early stage.

**The practical significance of the results:**

1. Algorithms for determining the technical condition of a 6-35 kV power transformer during a specific survey have been developed.

2. Software for determining the optimal number of measurements during the diagnosis of 10-35 kV power transformers using the method of analysis of amplitude-frequency characteristics.

3. The results of the dissertation are used in the educational process during the

teaching of disciplines "Computer diagnostics of electrical equipment"; in AC Vinnytsiaoblenerho, in LLC Ukrainian Technological Products, in the Department of Electrical Substations of the South-Western Electric Power System.

***Key words:*** diagnosing, damage, power transformer, frequency analysis, windings, planning, experiment, photovoltaic station.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

– в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

- [1] Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях*, 2017. № 23. С. 41-46.
- [2] Rubanenko O., Rubanenko O., Hryshchuk M. Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi. *Przeglad elektrotechniczny* 2020. No 3. P. 119–124.
- [3] Рубаненко О. Є., Грищук М. О., Лабзун М. П. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. № 186. С. 103–106.
- [4] Рубаненко О. Є., Грищук М. О., Лабзун М. П. Обґрунтування меж діапазону частот ачх трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 5, С. 171–176.
- [5] Грищук М. О., Рубаненко О. О., Рубаненко О. Є. Планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання результатів їх частотних характеристик. *Світлотехніка та енергетика.*, 2019. № 56. С. 92–98.

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

- [7] Грищук М. О. Аналіз пошкоджуваності силових трансформаторів електроенергетичних систем. *Матеріали конференції [XLVI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного*

- університету (2017)]. (Вінниця 5-13 березня 2017) / ВНТУ. 2017. С. 2755–2757.
- [8] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Дмуховський В. А. Обґрунтування частотних діапазонів ачх силових трансформаторів та реакторів для ідентифікації їх дефектів. *Матеріали конференції* [XIV Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)]. (Вінниця 15-17 жовтня 2018) / ВНТУ. 2018. С. 256–256.
- [9] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Дмуховський В. А., Лабзун М. П. Обґрунтування оптимальної кількості дослідів для визначення АЧХ силового трансформатора під час його відключення з метою діагностування. *II Всеукраїнська науково-технічна конференція* [Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018)]. (Харків Збірник наукових праць.«Друкарня Мадрид». 21-25 лютого 2018) / Харків. 2018. С. 43–45.
- [10] Грищук М. О. Визначення кількості вимірювань для адекватної оцінки результатів отриманих амплітудо-частотних характеристик силових трансформаторів. *Матеріали конференції XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)». (Вінниця 5-13 березня 2019) / ВНТУ. 2019. С. 2869–2870.*
- [11] Грищук М. О. Обґрунтування меж діапазону частот АЧХ трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків. *Матеріали конференції XLVII* [Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)]. (Вінниця 5-13 березня 2018) / ВНТУ. 2018. С. 3106–3108.
- [12] Грищук М. О. Результати накопичення бази амплітудо-частотних характеристик силових трансформаторів. *The 6th International scientific and practical conference Dynamics of the development of world science*

(Vancouver, Canada, February 19-21, 2020) / Perfect Publishing. 2020, P. 507–512.

- [13] Грищук М. О., Рубаненко О. Є. Визначення часу проведення технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик. *The 3 rd International scientific and practical conference Science, society, education: topical issues and development prospects* (Kharkiv, Ukraine, February 17-18, 2020). / Perfect Publishing. 2020. P. 118–120.

– які додатково відображають наукові результати дисертації:

- [6] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Дослідження пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електростанції. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.*, 2019. № 6, С. 178–183.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	17
Вступ .....	18
Розділ 1 Аналіз парку СТ та умов їх експлуатації в мережах з ФЕС.....	24
Аналіз парку СТ, що експлуатуються в Україні.....	25
Аналіз конструктивних особливостей СТ .....	29
Аналіз статистики відмов СТ в розподільних мережах з ФЕС .....	35
Аналіз умов функціонування СТ.....	43
Аналіз показників надійності СТ та їх вплив на показники надійності ЕЕМ з ФЕС.....	46
Висновки до розділу 1 .....	51
Розділ 2 Аналіз існуючих методів та засобів діагностування СТ .....	52
Аналіз діагностичних параметрів СТ.....	52
Дослідження основних методів діагностування СТ .....	54
Методи частотного діагностування .....	67
Узагальнення результатів аналізу.....	72
Висновки до розділу 2 .....	74
Розділ 3 Розроблення алгоритмів та методів визначення технічного стану СТ .	75
Вдосконалення методу визначення оптимальної послідовності випробувань СТ	76
Вдосконалення методу визначення технічного стану силового трансформатора шляхом повторних вимірювань АЧХ.....	86
Планування технічного обслуговування силових трансформаторів .....	97
Висновки до розділу 3 .....	101
Розділ 4 Розробка засобів контролю стану СТ .....	103
Розробка пристрою комплексного діагностування СТ.....	103
Розробка програмного забезпечення процесу діагностування СТ.....	106
Розроблення структурної схеми приладу діагностування .....	111
Оцінювання помилок першого і другого роду при визначенні стану СТ.....	114

	16
Опис програми для визначення інформативного діапазону частот відповідних дефекту СТ .....	124
Висновки до розділу 4 .....	126
Висновки.....	128
Перелік використаних джерел.....	130
Додаток А Акти впровадження результатів дисертації.....	152
Додаток Б Визначення контрольних меж відповідним дефектам на АЧХ .....	156
Додаток В Планування експерименту для визначення технічного стану трансформатора по АЧХ .....	203
Додаток Г Планування технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик .....	218
Додаток Д Отримані АЧХ.....	229
Додаток Е Протоколи програмного аналізу АЧХ .....	245
Додаток Ж Код програми.....	247
Додаток К Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	252



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕЕС – електроенергетична система;

СТ – силовий трансформатор;

МГЕС – мікро-гідроелектростанція;

ФЕС – фотоелектрична станція

ВЕС – вітроелектрична станція;

БіоЕС – біогазова електрична установка;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

FRA – Frequency Response Analysis (аналіз частотних відповідей);

ФЕС – фотоелектрична станція

ОСР – оператор системи розподілу

ТС – технічний стан

ВО – високовольтне обладнання

ОЕС – об'єднана енергетична система

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** У сучасних електроенергетичних системах силові трансформатори є одним з основних видів високовольтного обладнання [7]. Вихід з ладу СТ під час експлуатації значно погіршує параметри надійності та економічні показники роботи енергетичного підприємства [8]. Пошкодження СТ під час їх експлуатації в ЕЕС зменшує надійність та збільшує ймовірність відмови іншого обладнання.

Нині в Україні досить швидко розвиваються електрогенерувальні компанії, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, такі як наприклад мікро-ГЕС (МГЕС), фотоелектричні станції (ФЕС), вітроелектричні станції (ВЕС), біогазові електричні установки (БіоЕС) [6], [2]. Існування таких об'єктів неможливе без СТ. Та варто врахувати, що на таких об'єктах СТ пошкоджуються навіть в перші роки чи місяці експлуатації [3]. Так, наприклад, з лютого по серпень 2018 року на одній із ФЕС та на двох інших суміжних підстанціях пошкодились п'ять трансформаторів 35 кВ. З них (3+2) на двох з трьох місць експлуатації по два трансформатори.

Разом із тим, прийнята на сьогоднішній день концепція, планово попереджувальних робіт, під час експлуатації ТС, стає малоефективною, особливо для СТ класом напруги 35-0,4 кВ, які як правило, входять до складу ФЕС [9]- [11]. Це викликано рядом причин, основною з яких є економічна [12], [13]. Адже процес діагностування вимагає відключення їх від мережі, витрати на проведення діагностування і т.д [9], [10]. Крім того, на таких об'єктах, як ФЕС, недоцільно організувати відділ діагностування СТ, адже заводи-виробники такого обладнання дають досить великий термін експлуатації [6].

Вдосконалення існуючої системи діагностування силових трансформаторів, особливо класом напруги 35-0,4 кВ, є актуальним для сучасної електроенергетики, оскільки, наприклад, в Україні близько 40 – 50% трансформаторів відпрацювало свій паспортний ресурс, а статистика

пошкоджуваності свідчить про те, що пошкодження мають місце і у щойно введених в експлуатацію СТ [9], [10]. Значний вклад у вирішенні питання розробки та вдосконалення методів і засобів діагностування електричних машин внесли такі вітчизняні та закордонні вчені, як: Кутін В. М., Грабко В. В., П. Д. Лежнюк, С. В. Василець., В. В. Черкашина, Tenbohlen, S., Львов М. Ю., Поляков М. Уао, С., та інші не менш відомі, які у своїх працях, (наприклад [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]) досліджують перспективи розвитку діагностування електричних машин. Крім того, нині широко розвинені діагностичні комплекси, для визначення стану СТ, наприклад, комплекс діагностування основної ізоляції трансформаторів «Регіна», системи SAFE-T, TDM, СУМ-ТО, РЕТОМ, також системи розроблені фірмою OMICRON, Siemens, ABB TЕС, МЕДУС, та інші.

Так, вищевказані системи та комплекси, звичайно визначають стан СТ, однак, враховуючи статистику, необхідною є розробка нових методів та вдосконалення існуючих, для більш інформативного висновку про стан такого обладнання, особливо для СТ 35-0,4 кВ.

Отже, питання вдосконалення існуючих методів та засобів діагностування силових трансформаторів класом напруги 35-0,4 кВ, з метою зменшення кількості їх відмов, на початковій стадії їх розвитку, є актуальним, оскільки так як вирішення такої проблеми дозволить підвищити рівень надійнісних показників електроенергетичної мережі.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи становлять результати досліджень, що проводились на кафедрі електричних станцій та систем, в службі ремонтів високовольтного обладнання ВП НЕК Південно-Західної ЕЕС, АТ ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО та на приватних підприємствах з вироблення електричної енергії (зокрема на ФЕС) протягом 2016-2020 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку кафедри, тематики науково-дослідної роботи ВНТУ за держбюджетною темою «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні

мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 018U000206).

**Мета і завдання дослідження.**

**Метою дослідження** є підвищення якості визначення технічного стану силових трансформаторів розподільних мереж з ФЕС шляхом вдосконалення їх комплексного діагностування та виявлення пошкоджень на ранній стадії розвитку.

Відповідно до вказаної мети, в роботі вирішуються такі **основні задачі**:

1. Провести аналіз парку силових трансформаторів розподільних електричних мереж 10-35 кВ і фотоелектричних станцій, що експлуатуються в Україні, а також визначити вплив умов їх експлуатації на пошкоджуваність.

2. Запропонувати класифікацію існуючих методів та засобів діагностування силових трансформаторів з врахуванням особливостей аналізу ампліодно-частотних характеристик.

3. Розробити метод визначення дефектів СТ шляхом порівняння АЧХ, який за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонований за результатами виявлених відхилень АЧХ дозволить підтвердити, або спростувати дефект прогнозований за результатами контролю АЧХ;

4. Розвинути метод визначення технічного стану СТ, який шляхом врахування похибок вимірювальних приладів та використання D-оптимальних планів дозволяє визначити кількість повторних вимірювань АЧХ, що дає можливість зменшити помилки діагностування першого та другого роду.

5. Розвинути метод визначення оптимальної послідовності випробувань СТ в залежності від зміни результатів огляду СТ, оперативним персоналом, який шляхом врахування результату зовнішніх проявів дефекту, дозволяє вибрати оптимальну послідовність контролю та зменшити час на виявлення та обґрунтування можливого дефекту на ранній стадії його розвитку.

6. Розробити алгоритми визначення технічного стану СТ, під час обстеження СТ 6-35 кВ.

7. Розробити програмне забезпечення для визначення оптимальної кількості вимірювань, під час діагностування силових трансформаторів 10-35 кВ з використанням методу аналізу амплітудно-частотних характеристик.

**Об'єктом дослідження** дисертаційної роботи є процеси зміни відмов та умов експлуатації силових трансформаторів в розподільних мережах з ФЕС.

**Предметом досліджень** є методи та засоби визначення технічного стану силових трансформаторів.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач, аналізу та опрацювання за результатами дослідження, були використані методи: дисперсійного аналізу, контрольних меж, FRA аналізу, D-оптимальних планів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

1. Вперше розроблено метод пошуку дефектів силового трансформатора шляхом порівняння амплітудно-частотних характеристик, який за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонованих за результатами виявлених відхилень цих характеристик, дозволяє підтвердити або спростувати визначений дефект;

2. Отримав подальший розвиток метод визначення технічного стану силового трансформатора, який шляхом врахування похибок вимірювальних приладів та використання D-оптимальних планів дозволяє визначити кількість повторних вимірювань амплітудно-частотних характеристик, що дає можливість зменшити помилки діагностування першого та другого роду.

3. Отримав подальший розвиток метод визначення оптимальної послідовності випробувань силового трансформатора в залежності від зміни результатів їх огляду оперативним персоналом, який шляхом врахування результату зовнішніх проявів дефекту дозволяє вибрати оптимальну послідовність контролю та зменшити час на виявлення та обґрунтування можливого дефекту на ранній стадії його розвитку.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено алгоритми визначення технічного стану силового трансформатора 6-35 кВ під час обстеження.

2. Розроблено програмне забезпечення визначення оптимальної кількості вимірювань під час діагностування силових трансформаторів 10-35 кВ з використанням методу аналізу амплітудно-частотних характеристик.

3. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час викладання дисципліни «Комп'ютерні системи діагностики електричного обладнання», а також в «АК Вінницяобленерго», в ТОВ «Українські технологічні продукти», в Департаменті електричних підстанцій Південно-Західної електроенергетичної системи.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто. В роботах опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів; [3] – обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA; [4] – обґрунтування меж діапазону частот АЧХ трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків; [2] – планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання їхніх частотних характеристик; [6] – дослідження пошкодження СТ на ФЕС; [5] – планування технічного обслуговування СТ, з врахуванням АЧХ.

**Апробація матеріалів дисертації.** Головні результати дисертаційної роботи були подані та обговорювались на таких конференціях: XLVI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2017), Вінниця, 2017.; XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)», Вінниця, 2018.; XIV Міжнародна конференція КОНТРОЛЬ І УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ (КУСС-2018) )», Вінниця, 2018.; II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека

електроенергетичних систем (EEES-2018)»; XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)», Вінниця, 2019.; науково-практична конференція Експлуатація, діагностування, ремонт трансформаторів та іншого силового обладнання, діагностика трансформаторних оли. Безпека персоналу при виконанні робіт з експлуатації та ремонту. м. Львів, 2018.; the 3 rd International scientific and practical conference “Science, society, education: topical issues and development prospects” (February 17-18, 2020) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine. 2020.; the 6th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” (February 19-21, 2020) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2020.;

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 робіт, з них 5 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку рекомендованих ДАК, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, 7 статей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (180 найменувань) та додатків. Повний обсяг дисертації – 254 сторінки. Основний зміст викладено на 112 сторінках друкованого тексту, містить 53 рисунки та 12 таблиць.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- [1] Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях*, 2017. № 23. С. 41-46.
- [2] Rubanenko O., Rubanenko O., Hryshchuk M. Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi. *Przegląd elektrotechniczny* 2020. No 3. P. 119–124.
- [3] Рубаненко О. Є., Грищук М. О., Лабзун М. П. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. № 186. С. 103–106.
- [4] Рубаненко О. Є., Грищук М. О., Лабзун М. П. Обґрунтування меж діапазону частот ачх трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 5, С. 171–176.
- [5] Грищук М. О., Рубаненко О. О., Рубаненко О. Є. Планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання результатів їх частотних характеристик. *Світлотехніка та енергетика.*, 2019. № 56. С. 92–98.
- [6] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Дослідження пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електростанції. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.*, 2019. № 6, С. 178–183.
- [7] Грищук М. О. Аналіз пошкоджуваності силових трансформаторів електроенергетичних систем. *Матеріали конференції [XLVI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного*



- університету (2017)]. (Вінниця 5-13 березня 2017) / ВНТУ. 2017. С. 2755–2757.
- [8] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Дмуховський В. А. Обґрунтування частотних діапазонів ачх силових трансформаторів та реакторів для ідентифікації їх дефектів. *Матеріали конференції [XIV Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)]*. (Вінниця 15-17 жовтня 2018) / ВНТУ. 2018. С. 256–256.
- [9] Грищук М. О., Рубаненко О. Є., Дмуховський В. А., Лабзун М. П. Обґрунтування оптимальної кількості дослідів для визначення АЧХ силового трансформатора під час його відключення з метою діагностування. *II Всеукраїнська науково-технічна конференція [Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018)]*. (Харків Збірник наукових праць «Друкарня Мадрид». 3 - 6 грудня 2018) / Харків. 2018. С. 43–45.
- [10] Грищук М. О. Визначення кількості вимірювань для адекватної оцінки результатів отриманих амплітудо-частотних характеристик силових трансформаторів. *Матеріали конференції [XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)]*. (Вінниця 5-13 березня 2019) / ВНТУ. 2019. С. 2869–2870.
- [11] Грищук М. О. Обґрунтування меж діапазону частот АЧХ трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків. *Матеріали конференції [XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)]*. (Вінниця 5-13 березня 2018) / ВНТУ. 2018. С. 3106–3108.
- [12] Грищук М. О. Результати накопичення бази амплітудо-частотних характеристик силових трансформаторів. *The 6th International scientific and practical conference [Dynamics of the development of world science]*

- (Vancouver, Canada, February 19-21, 2020) / Perfect Publishing. 2020, P. 507–512.
- [13] Грищук М. О., Рубаненко О. Є. Визначення часу проведення технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик. *The 3<sup>rd</sup> International scientific and practical conference [Science, society, education: topical issues and development prospects]* (Kharkiv, Ukraine, February 17-18, 2020). / Perfect Publishing. 2020. P. 118–120.
- [14] Рубаненко А. Е., Казьмирук О. И. Контроль и улучшение нагрузочной способности трансформатора. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. № 3, С. 63-68.
- [15] Lezhniuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V. Reconciliation of generation graphics of renewable energy sources and load with help of morphometric analysis. *International Collection of scientific proceedings «European Cooperation»*. 2016. Vol. 16. P. 26-35.
- [16] Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungs transformatoren (em inglês). *Proc. Stuttgarter Hochspannungs symposium*. 2012. P. 61-70.
- [17] Кутін В. М., Ілюхін М. О., Кутіна М. В. Діагностика електрообладнання: [навч. посіб.]. Вінниця. Україна: ВНТУ, 2014. 239 с.
- [18] Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. Вінниця. Україна: ВНТУ, 2008. 219 с.
- [19] Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. Рівне. Україна: НУВГП, 2018. 187 с.
- [20] Бондаренко В. Е., Черемисин Н. М., Черкашина В. В. Study of the process of management of the operating modes of electric networks in modern conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015. Vol. 8. P. 11-18.

- [21] Тимчук С. О., Черемісін М. М., Черкашина В. В. Вдосконалення методів достовірності вихідної інформації на прикладах прогнозних задач в електроенергетиці. Монографія. Харків, Україна: «Факт». 2020. 239 с.
- [22] Ганус О. І., Старков К. О., Черкашина В. В. Складові перенапруг на елементах схеми заміщення трансформатора напруги. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2019. № 29. С. 41-46.
- [23] Бондаренко В., Горкунов Б., Черкашина В. Використання інноваційних технологій до проектування електричної лінії. *Наукова спадщина.*, 2020. №. 43-2 (43). С. 48-53.
- [24] Сивокобиленко В. Ф., Василець С. В. Динамічна модель асинхронного двигуна з урахуванням зубчатості магнітопроводів. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 2012. № 6. С. 91-100.
- [25] Комар, В. О., Оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. доктор технічних наук. 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи 2019. 302 с.
- [26] Маренич К. М., Василець С. В. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія. Донецьк, Україна: ДонНТУ. 2012. 206 с.
- [27] Грабко В. В., Дідушок О. В. Дослідження роботи електромагнітного приводу вакуумного вимикача як об'єкта діагностування. *НТУ «ХПІ»*. 2019. №9. С. 57-62.
- [28] Кутін В. М., Шпачук О. О., Нікітчук М. В., Світко В. М. Автоматизація аналізу теплового стану електрообладнання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 3, С. 51-56.
- [29] Мокин Б. И., Грабко В. В. Динь Тхань Вьет Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 1997. 130 с.

- [30] Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В. Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 18. С. 92-100.
- [31] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Відкрите засідання НКРЕКП 31 березня 2015 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2014 році (постанова від 31.03.2015 № 5001)». Київ, Україна: Електронний ресурс. 2015. 274 с.
- [32] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Відкрите засідання НКРЕКП 31 березня 2016 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2015 році (постанова від 31.03.2016 № 515)». Київ, Україна: Електронний ресурс. 2016. 285 с.
- [33] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Відкрите засідання НКРЕКП 30 березня 2017 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2016 році (постанова від 30.03.2017 № 460)». Київ, Україна: Електронний ресурс. 2017. 301 с..
- [34] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Відкрите засідання НКРЕКП 23 березня 2018 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2017 році (постанова від 23.03.2018 № 360)» Київ, Україна: Електронний ресурс. 2018. 300 с.

- [35] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Відкрите засідання НКРЕКП 29 березня 2019 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році (постанова від 29.03.2019 № 440)» Київ, Україна: Електронний ресурс. 2019. 291 с.
- [36] Лежнюк П. Д, Кравчук С. В, Котилко І. В. Відновлювальні джерела електроенергії в електричних мережах як елемент енергоефективного електроспоживання. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2019. № 56, С. 99-106.
- [37] Кизим Н. А, Лелюк А. В. Аналіз стану електроенергетичного сектора України. *In SPIN*, 2019. № 7616, С. 1550-1561.
- [38] Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Котилко І. О. Підвищення надійності електричних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії. *матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції. [Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті]. (Київ, 15-16 травня 2019 р) / Київ. 2019. С. 98-102.*
- [39] НЕК УКРЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://ua.energy/>
- [40] АТ ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://voe.com.ua/>
- [41] АТ ЖИТОМИРОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://www.ztoe.com.ua/>
- [42] ПрАТ КІРОВОГРАДОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://kiroe.com.ua/>
- [43] АТ ХАРКІВОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://www.oblenergo.kharkov.ua/>
- [44] АТ ХЕРСОНОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://ksoe.com.ua/>

- [45] АТ ХМЕЛЬНИЦЬКОБЛЕНЕРГО. Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <https://www.hoe.com.ua/>
- [46] АТ ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО. «Офіційний сайт [Онлайновий]. Режим доступу: <http://oblenergo.cv.ua/>
- [47] Сегеда М. С. «Математичне моделювання хвильових процесів в трансформаторах» // Технічна електродинаміка. — 2002.- № 3.- С. 47 — 49
- [48] Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І.О. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2015. № 41. С. 7-13.
- [49] Стогний Б. С., Рогоза В. В., Сопель М. Ф., Голубов О. Ю. Определение места однофазного замыкания на землю. *Технічна електродинаміка*. 2007. №2. С. 60-63.
- [50] ДСТУ 3270-95 “Трансформатори силові. Терміни та визначення”, Наказ від 19.12.1995 № 434. Український науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування. М. Издательство стандартов. 1995. 35 с.
- [51] «Силовий трансформатор» у Міжнародному електротехнічному словнику IEC 421-01-01.
- [52] Розводюк М. П., Вдовиченко В. Є., Розводюк К. М., Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2019. № 3, С. 35-47.
- [53] Александров Г.Н., Борисов В.В., Иванов В.Л. Электричні пристрої високого навантаження: Учебне пособие для вузов [Текст]. Харків, Україна: Енегоатоміздат, 1989. 325 с.

- [54] Ванин Б. В., Львов Ю. Н., Львов М. Ю. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 5. С. 58-61.
- [55] Chen J., Bi T., Sun M. Study on quality risk assessment for power transformer based on fault tree analysis. *China International Conference on [Electricity Distribution (CICED)]*. (IEEE, 2016). / China. 2016 P. 1-4.
- [56] Бардик Є. І., Білокур В. О. Моделювання і оцінка ефективності заміни силових трансформаторів з урахуванням терміну експлуатації. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*, 2016. №5. С. 162-165.
- [57] Tenbohlen S., Coenen S., Djamali M., Müller A., Samimi M., Siegel M. Diagnostic measurements for power transformers. *Energies*. 2016 Vol. 5. P. 347.
- [58] Волошко А. В., Бедерак Я. С. Оценка технического состояния силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4, С. 84-90.
- [59] Курашкін С. Ф., Попова І. О. Механізм пошкодження елементів конструкції силового трансформатора. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. № 186, С. 62-63.
- [60] Безменнікова Л. М., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Диагностирование силовых трансформаторов. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2011. № 3, С. 137-142.
- [61] Петруняк Р. М., Матусевич О. О. Дослідження та вдосконалення системи діагностики тягової підстанції на базі Smart технологій. *Електрифікація транспорту*. 2014. № 7, С. 132-136.
- [62] Wahi M., Director C. Prevention of Accidents on Distribution and Power Transformers. *Water & Energy International*. 2018. № 7, С. 132-136.

- [63] Khismatullin A. S. Method for increasing oil resources transformers with longterm operation. *IOP Conf. Series: [Materials Science and Engineering]*. 2018. Vol. 327. No. 2. P. 10-12.
- [64] Шкуринський Г., Бочаров В., Сприса В. Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання: затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р., Київ.: Державний стандарт України. ДП «ДонОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС». 2007. 262 с.
- [65] Коменда Н. В. Морфометрична класифікація графіків електричного навантаження промислових підприємств. *Вісник Вінницького національного політехнічного інституту*. 2011. № 1, С. 67-70.
- [66] Ключев О.В, Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “Електромеханіка”, Дніпродзержинськ, Україна: ДДТУ. 2013. 158 с.
- [67] Коменда Н. В. Морфометрична оцінка та критерій рівномірності графіка електричних навантажень. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*, 2010. № 66. С. 42-46.
- [68] *СОУ-Н ЕЕ 46.501: 2006*. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених в ізоляційному маслі. [Чинний від 01.03.2007], Київ. 2007. 92 с.
- [69] *ГДК 34.20.507-2003*. Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Правила. [Чинний від 2007-04-15]. Львів: ЛьвівОРГРЕС. 2015. 597 с.
- [70] *СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009*. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. Зі зміною № 1, 2018. Українська науково-технічна електроенергетична асоціація. Україна: Аселенерго. 2009. 597 с.



- [71] Малогулко Ю. В., Хавтирко В. В. Перспективні шляхи вдосконалення діагностики силових трансформаторів. *Матеріали конференції [XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)]*. (Вінниця 13-15 березня 2019) / ВНТУ. 2019. С. 48-51.
- [72] Писклярова А. В., Добровольський В. А. Дослідження методів діагностування силових трансформаторів *Матеріали конференції [XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)]*. (Вінниця 13-15 березня 2019) / ВНТУ. 2019. С. 35-38.
- [73] Долин А. Силовые трансформаторы 35 кВ и выше. Современные методы комплексной диагностики. *Новости электротехники*. 2006. № 2, С. 38.
- [74] Meira M., Ruschetti R., Álvarez E. Verucchi J. Power transformers monitoring based on electrical measurements. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, No 12, P. 2805-2815.
- [75] Ghoneim S. S. M, Taha I. B. M, Elkalashy N. I. Integrated ANN-based proactive fault diagnostic scheme for power transformers using dissolved gas analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23, No 3. P. 1838-1845.
- [76] Поляков М. А., Климов С. И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинга параметров силового трансформатора. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2016. № 637, С. 70-74.
- [77] *СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-104: 2014*. Методики оцінки технічного стану силових трансформаторів напругою від 35 кВ до 750 кВ. [Чинний від 2013-01-09]. Львів: ЛьвівКБ. 2014. 52 с.

- [78] Демидова-Панферова Р. М., Малиновский В. Н., Попов В. С. *Электрические измерения*. Москва, Российская Федерация: Энергоиздат. 1983. 378 с.
- [79] Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Долгополов В. П., Грумінська Л. В. *Метрологія та вимірювальна техніка Навчальний посібник*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2004. 125 с.
- [80] Кухарчук В. В., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т., Грабко В.В. *Основи метрології та електричних вимірювань : підручник*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012. 236 с.
- [81] Леонтьєв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. *Електротехнічні матеріали: навчальний посібник*. Вінниця, Україна: ВНТУ. 2013. 555 с.
- [82] Picher P., Lapworth J., Noonan T., Christian J. *Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis*. CIGRE WG A2.26, Technical Brochure. 2008. 342 с.
- [83] РД 16 363-87. Трансформаторы силовые Транспортирование, разгрузка, хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию. 1987. 36 с.
- [84] ГКД 34.46.501 – 2003. Трансформатори силові типова інструкція з експлуатації. Міністерство палива та енергетики України, Київ: Об'єднання енергетичних підприємств „Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2003. 25 с.
- [85] Yao C., Zhao Z., Chen Y., Zhao X., Li Z., Wang Y., Wei G. Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014. Vol. 21. No 4. P. 1486-1492.
- [86] Islam A., Khan I., Hoque A. Detection of mechanical deformation in old aged power transformer using cross correlation coefficient analysis method. *Energy and Power engineering*. 2019. Vol. 3. No 4. P. 585.
- [87] Miyazaki S., Tahir M., Tenbohlen S. Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency response analysis.

*IET Generation, Transmission & Distribution.* 2019. Vol. 13. No 15. P. 3493-3500.

- [88] Shintemirov A., Tang W., Wu Q. Transformer winding condition assessment using frequency response analysis and evidential reasoning. *IET Electric Power Applications.* 2010. Vol. 3. No 4., P. 198-212.
- [89] *IEC 60076-7. Power Transformers—Part 7: Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers*; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland. 2005. 195 p.
- [90] Reykherdt A., Davydov V. Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics. *IEEE Electrical Insulation Magazine.* 2011. Vol. 27. No 1. P. 22-30.
- [91] OMICRON, *FRA Analyzer User Manual Version.* FRA.AE.8, OMICRON electronics. 2009. 201 p.
- [92] Abeywickrama K., Serdyuk Y., Gubanski S. Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA). *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2006. Vol. 21. No 3, P. 1375-1382.
- [93] Reykherdt A., Davydov V. Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2011. Vol. 27. No 1. P. 22-30.
- [94] Bagheri M., Phung B., Blackburn T., Naderian A. Influence of temperature on frequency response analysis of transformer winding. *Proceedings of IEEE Electrical Insulation Conference.* (Ottawa, Canada) / 2013. P. 40-44.
- [95] Sano T., Miyagi K. Influence of Measurement Parameters on Frequency Response Analysis Diagnosis of Oil-Immersed Transformer. *Electrical Engineering in Japan,* 2014. Vol. 28. No. 186. P. 18-25.
- [96] Abeywickrama N., Serdyuk V., Gubanski M. Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers. *IEEE Transactions on Power delivery.* 2007. Vol. 23., No. 3. P. 1432-1438.

- [97] *IEC 60076-18* Ed.1: Power transformers - Part 18, "Measurement of frequency response", 2012. 132 p.
- [98] Rahimpour E., Christian J., Feser K., Mohseni H. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003. Vol. 18. No. 2. P. 493-505.
- [99] Jayasinghe J. A. S. B., Wang Z. D., Jarman P. N., Darwin A. W., Investigations on sensitivity of FRA technique in diagnosis of transformer winding deformations. *Proceedings of International Symposium on [Electrical Insulation]*. (Indianapolis. 2004) / 2004. P. 496-499.
- [100] Contin A., Rabach G., Borghetto J., Nigris M. D., Passaglia R., Rizzi G. Frequency response analysis of power transformers by means of fuzzy tools. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011. Vol. 18. No. 3. P. 900-909.
- [101] Ryder S. A. Methods for comparing frequency response analysis measurements. *in Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation*. (Boston. MA. 2002.) / 2002. P. 187-190.
- [102] Kennedy G. M., McGrail A. J., Lapworth J. A. Transformer Sweep Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. Vol. 23. No. 4. P. 28-33.
- [103] Rahimpour E., Tenbohlen S. Experimental and theoretical investigation of disc space variation in real high-voltage windings using transfer function method. *IET Electric Power Applications*. 2010. Vol. 4. No. 6. P. 451-461.
- [104] Rahimpour E., Jabbari M., Tenbohlen S. Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. No. 4. P. 2544-2555.

- [105] Wang M., Vandermaar A. J., Srivastava K. D. Transformer winding movement monitoring in service - key factors affecting FRA measurements. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2004. No. 20. P. 5-12.
- [106] Wang M., Vandermaar A. J., Srivastava K. D., Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. No. 20. P. 1930-1938.
- [107] Alsuhaibani S., Khan Y., Beroual A., Malik N. A review of frequency response analysis methods for power transformer diagnostics. *Energies*. 2019. Vol. 11. No. 9. P. 879.
- [108] Baldwin James F., Jonathan L., Trevor Martin P. A mass assignment based ID3 algorithm for decision tree induction. *International Journal of Intelligent Systems*. 1997. Vol. 12. No. 7. P. 523-552.
- [109] Smagulova A. Real-time Transformer Diagnosis using Voltage- Current Signal over Cloud Environment. *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. IEEE. 2018. P. 1-7.
- [110] Mao X. Accurate estimating algorithm of transfer function for transformer FRA diagnosis. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. – IEEE, 2018. P. 1-5.
- [111] Zhao X. Experimental evaluation of detecting power transformer internal faults using FRA polar plot and texture analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. No. 108. P. 1-8.
- [112] Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика*, Москва, Российская Федерация: Высшая школа. 1977. 235 p.
- [113] Kass G. V. An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data. *Applied Statistics*. 1980. Vol. 29. No. 2. P. 119—127.
- [114] Horváth T., Yamamoto A. Inductive Logic Programming. *Lecture Notes in Computer Science*. 2003. P. 2835.
- [115] Quan Y., Ning Z., Chen S., Li W., Xu T. Study on the methodology of detection for transformer winding insulation defects based on applied voltage

- test. *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012. P. 153-155.
- [116] Кутін В. М., Шпачук О. О., Вдосконалення захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором. *Нафтогазова енергетика*” *Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2016. т. 6. № 26. С. 47-56.
- [117] Болотний, М. П. Удосконалення математичних моделей оцінки технічного стану силових трансформаторів для підвищення достовірності визначення ризику порушення нормального режиму в підсистемах електроенергетичних систем: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Київ. 2019. 221 с.
- [118] Глазунов Л. П., Смирнов А. Н. *Проектирование технических систем диагностирования*. Ленинград. Российская Федерация: Энергоатомиздат. 1982. 125 с.
- [119] Кульчицький І. М. Концептуалізація понять “модель” та моделювання” у наукових дослідженнях. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Інформаційні системи та мережі. 2015. № 829. С. 273-284.
- [120] Barwise J., Feferman S., Feferman S. *Model-theoretic logics*. Cambridge University Press, 2017. Vol. 8. No. 2.
- [121] Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В. *Моделювання та оптимізація систем [Текст]*. Вінниця, Україна: ПП «ТД«Едельвейс». 2017. 64 с.
- [122] Dai W., Ji W. A mapreduce implementation of C4. 5 decision tree algorithm. *International journal of database theory and application*. 2014. Vol. 7. No. 1 P. 49-60.
- [123] Jariyavajee C., Polvichai J., Sirinaovakul B. Searching for Splitting Criteria in Multivariate Decision Tree Using Adapted JADE Optimization Algorithm.

*IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). – IEEE. 2019. P. 2534-2540.*

- [124] Паклин Н. Б., Орешков В. И. *Бизнес-аналитика: от данных к знаниям.* 2009. 124 с.
- [125] Ryder S. A. Methods for comparing frequency response analysis measurements. *in Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation.* (Boston. MA. 2002.) / 2002. P. 187-190.
- [126] Tang X. On-line analysis of oil-dissolved gas in power transformers using fourier transform infrared spectrometry. *Energies.* 2018. Vol. 11. No. 11. P. 1-15.
- [127] Zhao B., Yang M., Diao H. R., An B., Zhao Y. C., Zhang Y. M. A novel approach to transformer fault diagnosis using IDM and naive credal classifier. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2018. No. 105 P. 846-855.
- [128] Aj C., Salam M. A., Rahman Q. M., Wen F., Ang S. P., Voon W. Causes of transformer failures and diagnostic methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018. Vol. 82. P. 1442-1456.
- [129] Singh J., Singh S., Singh A. Distribution transformer failure modes, effects and criticality analysis (FMECA). *Engineering Failure Analysis.* 2019. No. 99. P. 180-191.
- [130] Нетребський В. В., Малогулко Ю. В. *Електрична частина станцій та підстанцій [Текст]: лабораторний практикум.* Вінниця, Україна: ВНТУ. 2017. 123 с.
- [131] Morsalin S. Diagnostic challenges in dielectric loss assessment and interpretation: a review. *IET Science, Measurement & Technology.* 2019. Vol. 13. No. 6. P. 767-782.
- [132] Malogulko Y., Khavtyrko V., Zatkhay M. Improvement of the classification system for power transformer defects. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2018. т. 6. № 1. С. 31-35.

- [133] Розводюк М. П. *Електричні машини. Організація самостійної роботи студентів [Текст]: навчальний посібник*. Вінниця. Україна: ВНТУ. 2016. 152 с.
- [134] Li B., Guo Y., Zhao S. Feasibility analysis of transformer winding DC resistance measuring on-line. in *2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)* / 2012. P. 568-571.
- [135] Chiulan T., Pantelimon B. A practical example of power transformer unit winding condition assessment by means of short-circuit impedance measurement. in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. 2009. P. 1-4.
- [136] Беляєв В. К., Паненко О. М., Вибір діагностичної моделі трансформатора для системи безперервного контролю механічного стану обмотки під навантаженням. *Вчені записки*. 2019. С. 120-197.
- [137] Orosz T., Tamus Z. Á. Impact of the cooling equipment on the key design parameters of a core-form power transformer. *Electrical Engineering*, 2016. Vol. 67. No. 6. P. 399- 406.
- [138] Залізняк І. Ю. Особливості технічної діагностики силових трансформаторів. *Матеріали конференції [XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)]. (Вінниця 5-13 березня 2018) / ВНТУ*. 2018. С. 31-33.
- [139] Piotrowski T., Rozga P., Kozak R. Comparative Analysis of the Results of Diagnostic Measurements with an Internal Inspection of Oil-Filled Power Transformers. *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 11. P. 2155.
- [140] Прохоров Ю. В. *Лекции по теории вероятностей и математической статистике: учебник и практикум для академического бакалавриата*. Москва. Российская Федерация: Юрайт. 2019. 69 с.
- [141] Стецюк П. І., Фесюк О. В., Сидорук В. А. *Алгоритми розв'язання задачі сепарабельного квадратичного програмування*. Київ. Україна: Комп'ютерна математика. 2017. 123 с.



- [142] Цюцюра М. І., Жирова Т. О., Котенко Н. О. *Альтернативне середовище програмування мовою С# для навчальних закладів*. Київ, Україна: Управління розвитком складних систем. 2018. 156 с.
- [143] Махровська Н. А., Погромська Г. С., Булгакова О. С. *Програмування: Мова програмування С++*, 2019. 123 с.
- [144] Лаврентьєва О. О., Солоха А. С. *Лабораторний практикум з електротехніки*. Кривий Ріг, Україна: КДПУ. 2017. 555 с.
- [145] Karegowda A. G., Manjunath A. S., Jayaram M. A. Comparative study of attribute selection using gain ratio and correlation based feature selection. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 271-277.
- [146] Dubnitskiy V., Zubrytska H., Khodyrev A. Визначення індексу Джині з урахуванням похибок вибіркового спостережень. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. т. 3, № 2, С. 52-59.
- [147] Domicolo C., Zhang P., Mahmoud H. The degree Gini index of several classes of random trees and their poissonized counterparts an evidence for a duality theory. *arXiv preprint arXiv: 2019*.
- [148] Мокін О. Б. Уточнення характеристик процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 4. С. 48-57.
- [149] Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Оцінювання помилок першого і другого роду при визначенні швидкості руху контактної системи елегазового вимикача. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2017. № 48. С. 110-114.
- [150] Бардик Є. І., Костерев М. В., Болотний М. П. Підвищення достовірності ідентифікації дефектів у силових трансформаторах електростанції настроюванням параметрів нечіткої моделі. *Наукові вісті НТУУ "КПІ" Енергетика та нові енергогенеруючі технології*. 2017. № 6. С. 27-37.

- [151] П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю В. Лук'яненко, *Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум*, Вінниця, Україна, ВНТУ, 2005.
- [152] Попова І. О., Щербаков, С. В., та Сідельніков, Б. Ю., «Експлуатаційні впливи на надійність елементів конструкції силових трансформаторів в АПК», в *Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали V-ї Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених*; (С. 11-14), 2020.
- [153] Хавтирко, В. В., *Дослідження дефектів в силових трансформаторах*, Doctoral dissertation, ВНТУ, 2018.
- [154] Костерев М. В, Літвінов В. В, та Кільова К. А, «Оцінка впливу зміни технічного стану обладнання електроенергетичної системи на імовірність його відмови на інтервалі часу», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси.*, т. 33, С. 85-93, 2017.
- [155] Матусевич О. О., Хворост М. В., та Малишева В. В., «Метод визначення технічного ресурсу силового трансформатора тягових підстанцій в умовах експлуатації», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.*, т. 87, № 3/8, С. 4-9 , 2017 doi: 10.15587/1729-4061.2017.103750.
- [156] Колесніченко А. Б, та Чепура О. В, «Оцінка станів силового трансформатора комплектної підстанції в нормальних і аварійних режимах», *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*, С. 243-246, 2018.
- [157] Ключев О.В, *Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “Електромеханіка”*, Дніпродзержинськ, Україна, ДДТУ, 2013.

- [158] *COY 40.1-21677681-07: 2009* "Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації" [Чинний від 2009-03-27], Слов'янськ: ДонОРГРЕС , 2009 112 с.
- [159] Picher, P, Tenbohlen, S., Lachman, M., Scardazzi, A та Patel, P. Current state of transformer FRA interpretation: On behalf of CIGRE WG A2. 53, *Procedia engineering*,, 2017 No 202, P. 3-12.
- [160] *ГОСТ 3484-77* Трансформаторы силовые. Методы испытаний. 1997. 67 с.
- [161] Islam A., Gayfutdinova E., Bulatova M., Ilkevich A. The method of power transformers and autotransformers windings condition determination, *MS&E*. 2020 Vol. 791, No 1, P. 12-28.
- [162] Akbari A., Firoozi H., Borsi H., Kharezi M. Assessment of Drying Quality for Power Transformer during Manufacturing Process Using Variation of Transfer Function. in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. (Kansas City, 2006) / 2006. P. 113-116.
- [163] Akbari A., Firoozi H., Karezi M. Investigations on sensitivity of frequency response analysis technique to measuring setup. *Presented at the 15th International Symposium on High Voltage Engineering*, (Ljubljana, Slovenia, 2007). / 2007. P. 1-4.
- [164] Smagulova A. Real-time Transformer Diagnosis using Voltage- Current Signal over Cloud Environment. *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. – *IEEE*. 2018. P. 1-7.
- [165] *IEEE Draft Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers*, IEEE PC57.149/D9.2 June 2012, 2012. P. 1-68.
- [166] Notingher P., Tanasescu G. Determination of Estimated, Consumed and Remaining Lifetimes of Paper - Oil Transformers Insulation Based on Winding Insulation Resistance. in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018)*. / 2018, P. 1-4.

- [167] Iwanusiw W., Eng P. The Art and Science of Transformer Ratio Measurement. *in 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2018)*. / 2018. P. 390-394.
- [168] Merritt S. Y. Anomalies in Interpretation of Transformer Oil Tests for Thermally Upgraded Paper—A Case History. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. No 1. P. 780- 784.
- [169] Алексеев, Б. А, *Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии*, Москва, Российская Федерация: НТФ Энергопрогресс, 2010. 87 с.
- [170] Матусевич, О. О., *Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія*, Дніпропетровськ, Україна, Дніпропетровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна., 2015. 300 с.
- [171] Shintemirov, A., Tang, W. H., Wu, Q. H. Transformer winding condition assessment using frequency response analysis and evidential reasoning. *IET Electric Power Applications*. 2009. Vol. 4, P. 198-212.
- [172] Miyazaki, S., Tahir, M., & Tenbohlen, S. Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency response analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018. Vol. 13. No. 15, P. 3493-3500.
- [173] Дубовой В. М., Глонь О. В. *Моделювання систем керування в умовах невизначеності [Текст]: монографія*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2004. 169 с.
- [174] Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії [Текст]. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 141. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. – Харків: ХНТУСГ. 2013. Р. 8–10.*

- [175] *СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007* Норми і випробування електрообладнання. Міністерство палива та енергетики України. Київ. 2007.
- [176] Гарбачук В., Деякі принципові проблеми теорії інформації на шляху до штучного інтелекту. *Штучний інтелект*. 2008. № 3, С. 28-35.
- [177] Dai J., Xu Q. Attribute selection based on information gain ratio in fuzzy rough set theory with application to tumor classification. *Applied Soft Computing*. 2013. Vol. 13. No 1. No. 211-221.
- [178] Subrata A. C. Maximum Power Point Tracking in PV Arrays with High Gain DC-DC Boost Converter. *6th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*. – IEEE. 2019. P. 358-362.
- [179] Furman E., Kye Y., Su J. Computing the Gini index: A note. *Economics Letter*. 2019. Vol. 185, P. 108-113.
- [180] Л. М. Добровська, *Основи програмування: методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів на PYTHON з навчальної дисципліни «Основи програмування» для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» зі спеціалізації «Інформаційні технології в біології та медицині»*, Київ, Україна: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2017. 254 с.

