

## 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 – займає значиме місце в електромережі. Такій електричній машині варто приділяти увагу під час його експлуатації, оскільки його вихід з ладу може призвести до серйозних проблем для електроенергетичного підприємства. Особливо актуальним постало питання з розвитком "зеленої" енергетики в Україні. Адже такі об'єкти є умовно керованими що призводить до частоті зміни режиму роботи, як підприємства що виробляє електричну енергію з альтернативних джерел так і для розподільних мереж в цілому.

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

Ця дисертація присвячена дослідженню аналізу частотної реакції з метою вдосконалення існуючих методів діагностування СТ. Так в процесі дослідження було проведено вимірювання амплітудо частотних характеристик, силових трансформаторів що часто експлуатуються на території України. Що дозволило сформулювати метод визначення оптимальної послідовності випробувань СТ в залежності від зміни результатів огляду СТ, оперативним персоналом. Розроблено алгоритм пошуку пошкоджень силових трансформаторів, що

забезпечить комплексний підхід, з метою мінімізації витрат часу, на проведення аналізу. Вдосконалено метод визначення дефектів СТ шляхом порівняння АЧХ, за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів. Вдосконалено метод оптимізації визначення технічного стану СТ, який шляхом врахування похибок вимірювальних приладів дозволяє визначити кількість повторних експериментів, що дозволяє зменшити помилки першого та другого роду. Вдосконалено 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. Вдосконалено метод визначення дефектів СТ шляхом порівняння АЧХ, який за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонований за результатами виявлених відхилень АЧХ дозволяє підтвердити, або спростувати дефект прогнозований за результатами контролю АЧХ.

Так у дисертаційній роботі поставлена й вирішена актуальна задача щодо визначення технічного стану силових трансформаторів що експлуатуються в розподільних електричних мережах з ФЕС.

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 СТ, що дозволив прийняти рішення щодо досліджуваних СТ, сформулювати обмеження та припущення в роботі. Визначено, що одним із ключових елементів, наших ЕЕМ, є СТ 35-0,4 кВ, та досить велика їх кількість, експлуатуються в Україні, тому прийнято рішення в подальшому досліджувати саме цей клас СТ. Проведений аналіз математичної моделі фрагменту розподільчої мережі, показав, що СТ, часто перебувають у доаварійних режимах, а СТ що 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 ЕЕМ, та показники що характеризують надійнісний стан СТ. Дослідження дозволять сформувавши методи та засоби діагностування, що дозволяють визначити технічний стан СТ.

Другим розділом 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. Приведено дослідження алгоритму, що дозволить, визначити готовність СТ до експлуатації. Визначено, що в даний час, методи амплітудо-частотного діагностування, є відносно новими, особливо в Україні. Проведено аналіз таких методів. Приведено 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.

В третьому розділі 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. Приведено 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, що 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 сформований алгоритм проведення комплексного діагностування СТ, що 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 сформуванню більш точні дані щодо стану СТ. Запропоновану структурну схему мікропроцесорного засобу, що забезпечить комплексний підхід до вимірювання контрольованих параметрів СТ. Запропоновано програмний засіб, що забезпечить комплексний підхід, до інтерпретації отриманих результатів під час обробки вимірних параметрів СТ.

**Наукова новизна отриманих результатів** що виносяться на захист, полягає у тому, що: отримав подальший розвиток метод оптимізації визначення технічного стану СТ, який шляхом врахування похибок вимірювальних приладів дозволяє визначити кількість повторних експериментів, що дозволяє зменшити помилки першого та другого роду; отримав подальший розвиток 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; отримав подальший розвиток метод визначення дефектів СТ шляхом порівняння АЧХ, який за рахунок контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонований за результатами виявлених відхилень АЧХ дозволяє підтвердити, або спростувати дефект прогнозований за результатами контролю АЧХ; отримано подальший розвиток методу визначення оптимальної кількості випробувань, який шляхом використання D-оптимальних планів, дозволяє зменшити похибку визначення технічного стану СТ.

**Практичне значення отриманих результатів** визначено як: розроблено алгоритми визначення технічного стану СТ, під час конкретного обстеження СТ 6-35 кВ; розроблено програмне забезпечення пристрою комплексного діагностування; розроблено програмний засіб для визначення оптимальної кількості вимірювань, під час комплексного діагностування.

Загалом, висновки з цієї дисертаційної роботи можуть використовуватись як експлуатуючими підприємствами так і тими що обслуговують такі підприємства. Використання запропонованих методик дозволить зменшити витрати на проведення технічного діагностування силового трансформатора, та підвищити якість отриманих результатів.

*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.

The power transformer occupies a significant place in the power grid. Such an electric machine should be given attention during its operation as its failure can lead to serious problems for the electric power company. This issue has become especially relevant with the development of "green" energy in Ukraine. After all, such facilities are conditionally controlled, which leads to frequent changes in the mode of operation, both for companies that generate electricity from alternative sources and for distribution networks in general. Currently one of the best diagnosing power transformers approaches is frequency response analysis (FRA) on a transformer. However, the use of such a method is complicated by the lack of regulatory documents which regulate its use on the territory of Ukraine in full, and the interpretation of the obtained results often remains a mystery to service companies. This thesis is devoted to the frequency response analysis study in order to improve available methods of power transformers diagnosing. Thus, in the research process the measurement of frequency response analysis of the power transformers which are often operated on the territory of Ukraine was carried out. Which allowed to form the power transformer optimal test sequence determining method depending on the personnel staff inspection results changes. Develop power transformer damage search algorithm, which will provide an integrated approach to minimize the time spent on analysis. Improve the power transformer defects determining method by comparing frequency response analysis due to additional diagnostic parameters control. Improve the power transformer technical condition optimization determination method, which allows to

determine the repeated experiments number by taking into account the measuring instruments errors, which reduces the first and second kind errors. Improve the power transformer optimal test sequence determining method depending on the personnel staff inspection results changes, which allows to choose the optimal control sequence and reduce the detection and justifying time of a possible defect at an early stage of its development by taking into account the result of external manifestations of the defect. Improve the power transformer defects determining method by comparing FRA due to additional diagnostic parameters control, proposed by the detected deviations based results of the FRA, allows to confirm or refute the defect predicted by the FRA control results.

Thus, in the dissertation the actual problem of determining the technical condition of power transformers operated in electrical distribution networks with photovoltaic station is set and solved.

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. An analysis of the fleet of power transformers and their design features of power transformer, which allowed making decisions about the studied power transformer, to form limitations and assumptions in the work. It is determined that one of the key elements of our computers is 35-0.4 kV substations, and many them are operated in Ukraine, so it was decided to further study this class of substations. The analysis of the mathematical model of the distribution network fragment showed that power transformer are often in pre-emergency modes, and power transformer operated on photovoltaic station are also significantly affected during frequent switching modes. Thus, the next step was a study of power transformer damage, which showed that both in Ukraine and abroad, power transformer continues to be damaged, despite the variety of existing methods and means of diagnosis. The indicators of computer reliability and indicators characterizing the reliability state of power transformer are determined. Research will allow forming methods and means of diagnosing that allow to determine the technical condition of power transformer.

The second section of the study analyzes the existing methods of diagnosing power transformer, which are described in the regulatory literature. The main methods that are often used in Ukraine to determine the technical condition of power transformer are considered. The research of the algorithm which will allow defining readiness of power transformer for operation is resulted. It is determined that at present, the methods of frequency amplitude diagnostics are relatively new, especially in Ukraine. The analysis of such methods is carried out. The analysis of influence of methods of frequency diagnostics on detection of defects of power transformer, during definition of its technical condition is resulted. 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 the power transformer 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 power transformer tests was further developed. This method will take into account the results of the inspection of power transformer operated at the photovoltaic station, operational staff, which by taking into account the 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. An algorithm of the proposed method for determining the optimal number of tests, which by taking into account the errors of FRAnalyzer and using D-optimal plans, allows reducing errors of the first and second kind when determining the technical condition of power transformer in operation. An algorithm is shown that allows to determine the date of the next inspection of the power transformer, which on the basis of pre-diagnosis, will provide full control of the technical condition of the power transformer.

In the fourth section of the dissertation research the formed algorithm of complex diagnostics of power transformer is described, that to reveal damages even at an early stage of their development. The proposed approach allows to optimize the sequence of actions during the diagnosis of power transformer, due to which the research will allow generating more accurate data on the state of power transformer. The structural



scheme of the microprocessor means is offered that will provide the complex approach to measurement of the controlled parameters of power transformer. A software tool that will provide a comprehensive approach to the interpretation of the results obtained during the processing of the measured parameters of power transformer is proposed. The scientific novelty of the obtained results submitted for defense is that: the method of optimization of determination of technical condition of power transformer was further developed, which by taking into account errors of measuring devices allows to determine the number of repeated experiments, which reduces errors of the first and second kind; further developed the method of determining the optimal sequence of power transformer tests depending on changes in the results of power transformer examination, operational staff, which by taking into account the result of external manifestations of the defect, allows you to choose the optimal control sequence and reduce time to identify and justify a possible defect at an early stage; further developed the method of determining power transformer defects by comparing the frequency response, which by controlling additional diagnostic parameters, proposed by the results of the detected deviations of the frequency response allows you to confirm or refute the defect predicted by the frequency response control; further development of the method of determining the optimal number of tests, which by using D-optimal plans, allows to reduce the error of determining the technical condition of the power transformer.

The practical significance of the obtained results is defined as: algorithms for determining the technical condition of the substation have been developed, during a specific survey of the 6-35 kV substation; the software of the device for complex diagnostics is developed; developed a software tool for determining the optimal number of measurements during complex diagnosis. In general, the conclusions from this thesis can be used by both operating enterprises and those who serve such enterprises. The use of the proposed techniques will reduce the cost of the power transformer technical diagnostics and improve the quality of the obtained results.

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

– в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- [1] О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун та М. О. Грищук, «Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів,» *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях*, т. 1245, № 23, pp. 41-46, 2017.
- [2] O. RUBANENKO, O. RUBANENKO та M. HRYSHCHUK, «Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi,» *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY Vol 2020*, № 3, p. 119–124, 2020.
- [3] О. Є. Рубаненко, М. О. Грищук та М. П. Лабзун, «Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA,» *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.*, № 186, p. 103–106, 2017.
- [4] О. Є. Рубаненко, М. О. Грищук та М. П. Лабзун, «Обґрунтування меж діапазону частот ачх трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків,» *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.*, № 5, p. 171–176, 2017.
- [5] М. О. Грищук, О. О. Рубаненко та О. Є. Рубаненко, «Планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання результатів їх частотних характеристик,» *Світлотехніка та енергетика.*, т. 3, № 56, p. 92–98, 2019.

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

- [7] М. О. Грищук, «Аналіз пошкоджуваності силових трансформаторів електроенергетичних систем,» в *Матеріали конференції «XLVI Науково-технічна*

- конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2017)» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/index/pages/view/zbir.>, Вінниця, 2017, С. 2755–2757.
- [8] М. О. Грищук, О. Є. Рубаненко та В. А. Дмуховський, «Обґрунтування частотних діапазонів ачх силових трансформаторів та реакторів для ідентифікації їх дефектів,» в *Матеріали конференції XIV Міжнародна конференція КОНТРОЛЬ І УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ (КУСС-2018) )*» [Електронний ресурс], Вінниця, Дата звернення: 15-17 жовтня 2018 року, С. 256–256.
- [9] М. О. Грищук, О. Є. Рубаненко, В. А. Дмуховський та М. П. Лабзун, «ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ДОСЛІДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЧХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІД ЧАС ЙОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ З МЕТОЮ ДІАГНОСТУВАННЯ,» в *II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018)»*. Збірник наукових праць. «Друкарня Мадрид», Харків, 2018, С. 43–45.
- [10] М. О. Грищук, «ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ АДЕКВАТНОЇ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ОТРИМАНИХ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ,» в *Матеріали конференції «XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)»*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/index/pages/view/zb>, Вінниця, 2019, С. 2869–2870.
- [11] М. О. Грищук, «ОБҐРУНТУВАННЯ МЕЖ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ АЧХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВІДПОВІДНОГО ДЕФЕКТАМ ЗСУВУ ВИТКІВ,» в *Матеріали конференції «XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)»*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/index/pages/view/zbi>, Вінниця, 2018, С. 3106–3108.

- [12] М. О. Грищук, «РЕЗУЛЬТАТИ НАКОПИЧЕННЯ БАЗИ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ,» в *The 6th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” (February 19-21, 2020) Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2020. 1324 p. – С. 507–512. ISBN 978–1–4879–3791–1.*
- [13] М. О. Грищук та О. Є. Рубаненко, «Визначення часу проведення технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик,» в *The 3rd 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. С. 118–120. ISBN 978–966–8219–83–2.*

– які додатково відображають наукові результати дисертації:

- [6] М. О. Грищук, О. Є. Рубаненко та І. О. Гунько, «ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ФОТОВОЛЬТАІЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ,» *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.*, № 6, р. 178–183, 2019.