

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Пономаренко Сергій Григорович

УДК 621.315.615.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ
ТРАНСФОРМАТОРНИХ МАСЕЛ В ОБЛАДНАННІ 110 - 330 КВ З
УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**


141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

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.

*Згідно з змістом
за змістом з
першим припис-
ником дисертації
завершено*

 С. Г. Пономаренко

Науковий керівник
Шутенко Олег Володимирович,
кандидат технічних наук, доцент

Вчений секретар:



Харків – 2023

Ю. А. ЗАЙЦЕВ

АНОТАЦІЯ

Пономаренко С. Г. Удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110–330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (14 – електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2023.

Мета роботи полягає у вирішенні завдання по удосконаленню методів та критеріїв, що використовуються для оцінки стану трансформаторних масел, з урахуванням тривалості та режимів експлуатації трансформаторів напругою 110 кВ та автотрансформаторів напругою 330 кВ.

Об'єкт дослідження – процеси старіння трансформаторних масел у баках трансформаторів та автотрансформаторів 110-330 кВ з урахуванням режимів та тривалості експлуатації.

Предмет досліджень – параметри масел, що характеризують його стан, в баках трансформаторів та автотрансформаторів 110-330 кВ, що експлуатуються в різних режимах.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У *першому розділі* виконано аналіз експлуатаційної надійності високовольтних силових трансформаторів і автотрансформаторів, що експлуатуються в електричних мережах України. Розглянуто основні причини ушкодження трансформаторів та автотрансформаторів, та проаналізовано вплив трансформаторних масел на надійність цього обладнання.. Проаналізовано методи та критерії, що використовуються для оцінки

технічного стану трансформаторних масел як в Україні так і за її межами. високовольтного обладнання електричних мереж. Проаналізовано основні напрямки удосконалення методів оцінки технічного стану обладнання, що застосовуються закордонними дослідниками. За результатами аналізу сформовано основні напрямки досліджень.

У другому розділі розроблено методи для коригування граничних значень показників трансформаторних масел. Виконано дослідження законів розподілу показників трансформаторних масел для силових трансформаторів і автотрансформаторів напругою 110 кВ та 330 кВ. Встановлено, що як для масел придатних так й не придатних до подальшої експлуатації значення показників мають розподіл Вейбула. Подальший аналіз показав, що щільності розподілу показників для масел з різним станом перетинаються, що свідчить про те що корегування граничних значень показників масел можливо тільки з використанням методів статистичних рішень. За результатами порівняльного аналізу ймовірностей вірних та хибних рішень, а також значень ризиків, що супроводжують використання граничних значень отриманих методом інтегральних функцій (виживання), методом мінімальної кількості хибних рішень, методом мінімального ризику та методом Неймана Пірсона встановлено, що найбільш оптимальним методом корегування є метод мінімального ризику. Визначені граничні значення показників масел для одномірних розподілів з урахуванням режимів та тривалості експлуатації. Встановлено що використання цих значень дозволяє знизити можливі ризики 1,05 - 4974419,5 разів порівняно з ризиками, що супроводжують використання граничних значень регламентованих в діючому в Україні нормативному документі. Для урахування фізичних особливостей старіння масел запропоновано корегувати граничні значення показників масел одночасно для декількох діагностичних ознак. Для цього проаналізовано стохастичний зв'язок між показниками масел. Розроблено функцію середнього ризику для двомірних та трьохмірних розподілів, показників що мають значущий стохастичний зв'язок. Мінімізація розроблених функцій методом Нелдера- Міда дозволило

отримати граничні значення використання яких призведе до зниження ризиків в 1,7-84,4 разів порівняно з ризиками, що супроводжують використання граничних значень регламентованих в діючому в Україні нормативному документі.

У третьому розділі розроблено метод для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, що базується на використанні варіативних граничних значень показників. За результатами коваріаційного аналізу показників масел та тривалості експлуатації встановлено наявність значущої систематичної складової в часових залежностях показників. При цьому швидкість дрейфу одного й того ж показника в різних автотрансформаторах суттєво відрізняється, в залежності від режимів та умов експлуатації, а також якості масел. Для врахування відмінностей в інтенсивності старіння масел, розроблено процедуру для формування еталонних масивів показників масел, в умовах обмеженої апріорної інформації. Результати двофакторного дисперсійного аналізу показників масел з сформованих еталонних масивів, свідчать щодо наявності значущого впливу режимів та тривалості експлуатації на значення показників масел. За результатами дисперсійного аналізу на відхилення від лінійності часових залежностей показників трансформаторних масел встановлено що зміна значень показників в часі відбувається з різною швидкістю, тобто залежності є нелінійними. Для ранньої діагностики стану трансформаторних масел з урахуванням впливу режимів та тривалості експлуатації, а також нелінійного характеру зміни показників масел в часі розроблено метод варіативних граничних значень показників.

У четвертому розділі розроблено метод для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, за комплексом діагностичних ознак. Запропоновано модель множинної регресії в якій тривалість експлуатації є функцією значень показників трансформаторних масел. Розроблено процедуру навчання регресійної моделі, для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, за комплексом діагностичних ознак. Сформовано вирішальне правило згідно з яким приймається рішення щодо стану трансформаторних масел. Для

урахування впливу режимів експлуатації, а також сорту та якості трансформаторних масел на інтенсивність процесів старіння, запропоновано використовувати групу моделей навчених по значенням показників автотрансформаторів що експлуатуються в різних умовах. Виконано навчання та доведено адекватність 4 моделей для автотрансформаторів напругою 330 кВ за результатами аналізу встановлено похибка що виникає при діагностиці стану масел знаходиться в межах 0,327-0,407 року.

За результатами наукового дослідження отримано наступні результати:

1. Вперше встановлено та науково обґрунтовано що значення параметрів трансформаторних масел, як придатних так і не придатних до подальшої експлуатації, розподілені згідно з законом Вейбулу, при цьому встановлено значущий вплив режимів та умов експлуатації обладнання на значення цих параметрів, що обумовлює необхідність їх урахування при корегуванні граничних значень показників масел;

2. Вперше науково обґрунтовано використання граничних значень показників трансформаторних масел, які визначаються мінімізацією функції середнього ризику для одномірних розподілів, з урахуванням режимів експлуатації трансформаторів та автотрансформаторів напругою 110-330 кВ, що дозволило для трансформаторів 110 кВ знизити ризики в 1,05-37,2 рази, а для автотрансформаторів 330 кВ в 1,8-4974419,5 разів порівняно з ризиками, що супроводжують використання граничних значень регламентованих в діючому в Україні нормативному документі;

3. Вперше запропоновано метод для корегування граничних значень показників трансформаторних масел за комплексом діагностичних ознак з урахуванням особливостей процесу старіння трансформаторних масел, а також режимів та умов експлуатації трансформаторів 110 кВ, та автотрансформаторів 330 кВ, який відрізняється від існуючих тим, що граничні значення показників масел визначаються за рахунок мінімізації функції середнього ризику для багатомірних розподілів показників, що мають значущий стохастичний зв'язок, що дозволить знизити ризики в 1,7-35,7 рази для трансформаторів 110 кВ, а для

автотрансформаторів 330 кВ в 8-84,4 разів порівняно з ризиками, що супроводжують використання граничних значень регламентованих в діючому в Україні нормативному документі;

4. Отримав подальший розвиток метод визначення характеру залежностей показників трансформаторних масел, який відрізняється урахуванням тривалості експлуатації, що дозволило встановити, що в автотрансформаторах 330 кВ, значення показників у часі змінюються нелінійно, а характер залежностей окремих показників співпадає з кінетичними кривими окислювання;

5. Вперше розроблено модель множинної регресії для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, за комплексом діагностичних ознак, з урахуванням умов та режимів експлуатації обладнання, що на відміну від існуючих дозволяє виявляти обладнання з прискореним старінням масел, ще в той момент часу коли значення показників знаходяться в області що відповідають нормальному стану. Встановлено що похибка оцінки навчених моделей знаходиться в межах 0,327-0,407 року

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетики:

1) Отримані та науково обґрунтовані варіативні граничні значення показників масел, які змінюються в залежності від тривалості та режимів експлуатації трансформаторів, використовуються в якості додаткових критеріїв при оцінці стану трансформаторних масел в рамках проведення періодичних випробувань службою ізоляції та грозозахисту АТ «Харківобленерго»;

2) Розроблена методика для формування еталонних траєкторій показників ізоляції в умовах обмеженої апріорної інформації використовується в науковій діяльності кафедри передачі електроенергії НТУ «ХПІ» при дослідженні процесів старіння ізоляції високовольтного обладнання електричних мереж;

3) Розроблені методи діагностики стану трансформаторних масел, програмно реалізовані в вигляді окремих модулів інформаційно-аналітичної системи «СИРЕНА», яка на даний час розробляється на кафедрі «Передача

електричної енергії» НТУ «ХП»;

4) Отримані в роботі результати використовуються у навчальному процесі на кафедрі «Передача електричної енергії» в освітніх компонентах: «Техніка високих напруг», «Математичні основи технічної діагностики» та «Математичні задачі енергетики» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Ключові слова: експлуатація, автотрансформатори, режими роботи, обладнання електричних мереж, неруйнівний контроль, трансформатори, трансформаторні масла, технічний стан, показники ізоляції, тангенс дельта, діагностика, моделювання, старіння, регресійна модель, навчання.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ponomarenko S. Development of a multiple regression model for early diagnosis of transformer oil condition / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022. Vol. 47, no. 11. P. 14119–14132.
2. Ponomarenko S. Analysis of ageing characteristics of transformer oils under long-term operation conditions / Shutenko O., Ponomarenko S // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2022. Vol. 46, no. 2. P. 481–501.
3. Ponomarenko S. Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. Kharkiv, 2021. No. 5. P. 46–56.
4. Пономаренко С. Г. Коригування гранично допустимих значень пробивної напруги трансформаторних масел методом мінімального ризику / Шутенко О. В., Пономаренко С. Г. // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків, 2022. № 1 С. 105–114.
5. Пономаренко С. Г. Порівняльний аналіз інтенсивності старіння масла в трансформаторах напругою 110 кВ та автотрансформаторах напругою

330 кВ / Пономаренко С. Г. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків, 2021. № 2(3) С. 124–136.

6. Пономаренко С. Оцінка ефективності процедур статистичної обробки для підвищення достовірності результатів експлуатаційного контролю стану трансформаторних масел / Шутенко О., Пономаренко С. // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. Харків, 2022. № 11-12(165-166). С. 43–56.

7. Пономаренко С. Г. Формування еталонних траєкторій показників трансформаторних масел для автотрансформаторів 330 кВ / Пономаренко С. Г. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків, 2022. № 1(4). С. 56–66.

8. Пономаренко С. Г. Аналіз особливостей старіння трансформаторних масел в автотрансформаторах 330 кВ протягом тривалої експлуатації / Пономаренко С. Г. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків, 2022. № 2(5). С. 58–66.

9. Пономаренко С. Г. Аналіз впливу тривалості експлуатації на значення показників масла в автотрансформаторах 330 кВ / Пономаренко С. Г. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків, 2023. № 1 (6). С. 65–76.

ABSTRACT

Ponomarenko S. H. Improvement of diagnostic methods of transformer oil condition in 110-330 kV equipment taking into account the influence of operating modes and conditions. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 “Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics” (14 – Electrical engineering). – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2023.

The aim of the study is to solve the problem of improving the methods and criteria used to assess the condition of transformer oils, taking into account the duration and operating modes of 110 kV transformers and 330 kV autotransformers.

The object of study is the aging processes of transformer oils in the tanks of 110-330 kV transformers and autotransformers, taking into account the operating modes and duration of operation.

The subject of research is the parameters of oils that characterise its condition in the tanks of 110-330 kV transformers and autotransformers operated in different modes.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, defines the research objectives, shows the connection of the work with scientific topics, provides information on scientific novelty, practical significance, approbation of results and publications.

The *first chapter* analyses the operational reliability of high-voltage power transformers and autotransformers operated in the Ukrainian electrical networks. The main causes of damage to transformers and autotransformers are considered, and the influence of transformer oils on the reliability of this equipment is analysed. The methods and criteria used to assess the technical condition of transformer oils in Ukraine and abroad are analysed. The main directions of improving the methods of assessing the technical condition of equipment used by foreign researchers are analysed. The main directions of research are formed.

In the *second chapter*, the methods for adjusting the limit values of transformer

oil indicators are developed. The laws of distribution of transformer oils for 110 kV and 330 kV power transformers and autotransformers were studied. It is established that both for oils suitable and not suitable for further operation, the values of the indicators have a Weibull distribution. Further analysis has shown that the densities of the distribution of indicators for oils with different conditions overlap, which indicates that the adjustment of the limit values of oil indicators is possible only using statistical decision methods. Based on a comparative analysis of the probabilities of correct and incorrect decisions, as well as the risk values associated with the use of limit values obtained by the method of integral functions (survival), the method of the minimum number of incorrect decisions, the method of minimum risk and the Neumann Pearson method, it was found that the most optimal method of correction is the method of minimum risk. The limit values of oil indicators for univariate distributions are determined, taking into account the modes and duration of operation. It is established that the use of these values allows reducing the possible risks by 1.05 - 4974419.5 times compared to the risks associated with the use of the limit values regulated in the current regulatory document in Ukraine. To account for the physical characteristics of oil aging, it is proposed to adjust the limit values of oil indicators for several diagnostic features simultaneously. For this purpose, the stochastic relationship between the oil indicators is analysed. An average risk function was developed for two- and three-dimensional distributions of indicators with a significant stochastic relationship. Minimisation of the developed functions by the Nelder-Mead method allowed obtaining limit values, the use of which will lead to a reduction in risks by 1.7-84.4 times compared to the risks associated with the use of limit values regulated in the current regulatory document in Ukraine.

The *third chapter* develops a method for early diagnostics of the state of transformer oils based on the use of variable limit values of indicators. The results of the covariance analysis of oil indicators and the duration of operation revealed the presence of a significant systematic component in the time dependencies of the indicators. At the same time, the drift rate of the same indicator in different autotransformers differs significantly, depending on the operating modes and

conditions, as well as the quality of oils. To account for differences in the intensity of oil aging, a procedure was developed to form reference arrays of oil indicators under conditions of limited a priori information. The results of the two-factor analysis of variance of oil indicators from the formed reference arrays indicate the presence of a significant influence of operating conditions and duration of operation on the values of oil indicators. The results of the analysis of variance for deviations from the linearity of the time dependencies of transformer oils' indicators show that the change in the values of indicators in time occurs at different rates, meaning that the dependencies are nonlinear. For early diagnostics of the state of transformer oils, considering the influence of operating modes and duration of operation, as well as the nonlinear nature of changes in oil indicators over time, a method of variable limit values of indicators has been developed.

The *fourth chapter* presents a method for early diagnostics of transformer oils by a set of diagnostic features. A multiple regression model is proposed in which the duration of operation is a function of the values of transformer oil indicators. A procedure for training a regression model for early diagnosis of the state of transformer oils by a set of diagnostic features has been developed. A decisive rule has been formed to determine the state of transformer oils. To account for the influence of operating modes, as well as the grade and quality of transformer oils on the intensity of aging processes, it is proposed to use a group of models trained on the values of indicators of autotransformers operated under different conditions. Training has been performed and the adequacy of 4 models for 330 kV autotransformers has been proved; according to the results of the analysis, the error arising from the diagnosis of the oil condition is within 0.327-0.407 years.

The following *scientific results* were obtained from the study:

1. The values of parameters of transformer oils, both suitable and unsuitable for further operation, are distributed according to the Weibull law for the first time, and a significant influence of modes and conditions of equipment operation on the values of these parameters is established, which necessitates their consideration when adjusting the limit values of oil indicators.

2. The use of limit values of transformer oil indicators determined by minimising the average risk function for one-dimensional distributions, considering the operating modes of transformers and autotransformers with voltage of 110-330 kV, was scientifically substantiated for the first time, which allowed to reduce the risks for 110 kV transformers by 1.05-37.2 times, and for 330 kV autotransformers by 1.8-4974419.5 times compared to the risks associated with the use of limit values regulated in the current Ukrainian regulatory document.

3. A method for adjusting the limit values of transformer oil indicators by a set of diagnostic features, considering the peculiarities of the aging process of transformer oils, as well as the modes and operating conditions of 110 kV transformers and 330 kV autotransformers, is proposed for the first time, which differs from the existing ones because the limit values of oil indicators are determined by minimizing the average risk function for multivariate distributions of indicators with a significant stochastic relationship, which will reduce the risks by 1.7-35.7 times for transformer oils.

4. The method of determining the nature of the dependencies of transformer oil indicators was further developed, which differs in consideration of the duration of operation, which made it possible to establish that in 330 kV autotransformers, the values of indicators change nonlinearly over time, and the nature of the dependencies of individual indicators coincides with the kinetic curves of oxidation.

5. A multiple regression model for early diagnostics of transformer oils, based on a set of diagnostic features, is developed for the first time, considering the conditions and modes of equipment operation, which, unlike existing ones, allows to identify equipment with accelerated oil aging, even when the values of indicators correspond to the normal state. It was found that the error of the trained models estimation is in the range of 0.327-0.407.

Practical implications of the results for the electric power industry:

1) The obtained and scientifically substantiated variable limit values of oil indicators, which vary depending on the duration and operating modes of transformers, are used as additional criteria for assessing the condition of transformer

oils as part of periodic tests by the Insulation and Lightning Protection Service of JSC Kharkivoblenergo.

2) The developed methodology for the formation of reference trajectories of insulation indicators under conditions of limited a priori information is used in the scientific activities of the Department of Electric Power Transmission of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” in the study of the aging processes of insulation of high-voltage equipment of electrical networks.

3) Methods for diagnosing the condition of transformer oils have been developed and implemented as separate modules of the informational and analytical system "SYRENA", which is currently being developed at the Department of Electric Power Transmission of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”.

4) The results of the dissertation are used in the educational process at the Department of Electric Power Transmission in the educational components “High Voltage Equipment”, “Mathematical Basics of Technical Diagnostics” and “Mathematical Problems of Energy” of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”.

Keywords: operation, autotransformers, operating modes, power grid equipment, non-destructive testing, transformers, transformer oils, technical condition, insulation performance, delta tangent, diagnostics, modeling, aging, regression model, learning.

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results are published:

1. Ponomarenko S. Development of a multiple regression model for early diagnosis of transformer oil condition / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47, no. 11. P. 14119–14132.

2. Ponomarenko S. Analysis of ageing characteristics of transformer oils under long-term operation conditions / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Iranian Journal of*

Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2022. Vol. 46, no. 2. P. 481–501.

3. Ponomarenko S. Analysis of distribution laws of transformer oil indicators in 110-330 kV transformers / Shutenko O., Ponomarenko S // *Electrical Engineering & Electromechanics*. Kharkiv, 2021. No. 5. P. 46–56.

4. Ponomarenko S. Correction of transformer oil breakdown voltage maximum permissible values by the minimum risk method / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. Kharkiv, 2022. № 1 P. 105–114.

5. Ponomarenko S. Comparative analysis of oil ageing intensity in 110 kV transformers and 330 kV autotransformers / Ponomarenko S. // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. Kharkiv, 2021. № 2(3) P. 124–136.

6. Ponomarenko S. Evaluating the effectiveness of statistical processing procedures to improve the reliability of the results of inservice control of the condition of transformer oils / Shutenko O., Ponomarenko S. // *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. Kharkiv, 2022. № 11-12(165-166). P. 43–56.

7. Ponomarenko S. Formation of reference trajectories for transformer oil indicators for 330 kV autotransformers / Ponomarenko S. // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. Kharkiv, 2022. № 1(4). P. 56–66.

8. Ponomarenko S. Analysis of the ageing characteristics of transformer oils in 330 kV autotransformers during long-term operation / Ponomarenko S. // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. Kharkiv, 2022. № 2(5). P. 58–66.

9. Ponomarenko S. Analysis of the influence of service life on the value of oil indicators in 330kV autotransformers / Ponomarenko S. // *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. Kharkiv, 2023. № 1 (6). P. 65–76.