УДК 621.315.615.2 **doi: 10.20998/2224-0349.2020.01.16**

О. В. ШУТЕНКО, С. Г. ПОНОМАРЕНКО

КОРИГУВАННЯ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ ПРОБИВНОЇ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРНИХ МАСЕЛ МЕТОДОМ МІНІМАЛЬНОГО РИЗИКУ

Запропоновано метод коригування гранично допустимих значень пробивної напруги трансформаторних масел з метою мінімізації можливого економічного збитку в разі прийняття помилкових рішень при діагностиці стану трансформаторних масел за результатами періодичних випробувань. Наведено опис алгоритму статистичної обробки результатів періодичних випробувань, використання якого дозволяє сформувати масиви з однорідними значеннями показників в умовах апріорної обмеженості вимірювальної інформації. Виконано аналіз законів розподілу значень пробивної напруги для трансформаторних масел, придатних і не придатних до експлуатації за значеннями даного показника. За результатами аналізу встановлено, що значення пробивної напруги масел з різним станом мають розподіл Вейбула. Встановлено, що значення математичних очікувань пробивної напруги масел, придатних до експлуатації зі старінням трансформаторних масел, зсуваються в область низьких значень. З цього випливає, що гранично допустимі значення пробивної напруги масел для даних розподілів повинні відрізнятися. Підтверджено раніше відомий факт, що для одномодальних розподілів гранично допустиме значення показників, що забезпечують мінімум ризику, знаходиться в інтервалі, обмеженому математичними очікуваннями розподілів показника з різним станом. Сформульовано вирішальне правило і складена функція середнього ризику для коригування гранично допустимих значень пробивної напруги трансформаторних масел. На основі мінімізації функції середнього ризику методом Ньютона визначені гранично допустимі значення пробивної напруги масел. Виконаний порівняльний аналіз показав, що коригування гранично допустимих значень пробивної напруги масел дозволяє знизити значення ризиків у 1,52÷19,13 разів, в порівнянні з ризиками, які забезпечують використання гранично допустимих значень, регламентованих в стандартах. Встановлено, що гранично допустимі значення пробивної напруги масел, що забезпечують мінімальне значення середнього ризику, не є постійними. Вони змінюються в залежності від значень цін помилкових рішень і ймовірностей появи різних станів масла дефектного і бездефектного стану трансформаторів.

Ключові слова: силові трансформатори, діагностика, трансформаторне масло, пробивна напруга, результати періодичних випробувань, статистичний аналіз, закони розподілу, гранично допустимі значення, мінімальний ризик.

О. В. ШУТЕНКО, С. Г. ПОНОМАРЕНКО

КОРРЕКТИРОВКА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ МЕТОДОМ МИНИМАЛЬНОГО РИСКА

Предложен метод корректировки предельно допустимых значений пробивного напряжения трансформаторных масел с целью минимизации возможного экономического ущерба в случае принятия ошибочных решений при диагностике состояния трансформаторных масел по результатам периодических испытаний. Приведено описание алгоритма статистической обработки результатов периодических испытаний, использование которого позволяет сформировать массивы с однородными значениями показателей в условиях априорной ограниченности измерительной информации. Выполнен анализ законов распределения значений пробивного напряжения для трансформаторных масел годных и не годных к эксплуатации по значениям данного показателя. По результатам анализа установлено, что значения пробивного напряжения масел с разным состоянием имеют распределение Вейбулла. Установлено, что значения математических ожидания пробивного напряжения масел годного к эксплуатации по мере старения трансформаторных масел сдвигаются в область низких значений. Из этого следует, что предельно допустимые значения пробивного напряжения масел для данных распределений должны отличаться. Подтвержден ранее известный факт, что для одномодальных распределений предельно допустимые значения показателей, которые обеспечивают минимум риска, находится в интервале, ограниченном математическими ожиданиями распределений показателя с разным состоянием. Сформулировано решающее правило и составлена функция среднего риска для корректировки предельно допустимых значений пробивного напряжения трансформаторных масел. На основе минимизации функции среднего риска методом Ньютона определены предельно допустимые значения пробивного напряжения масел. Выполненный сравнительный анализ показал, что корректировка предельно допустимых значений пробивного напряжения масел позволяет снизить значения рисков в 1,52÷19,13 раз, по сравнению с рисками, которые обеспечивают использование предельно допустимых значений, регламентированных в стандартах. Установлено, что предельно допустимые значения пробивного напряжения масел, обеспечивающие минимальное значение среднего риска, не являются постоянными. Они изменяются в зависимости от значений цен ошибочных решений и вероятностей появления различных состояний масла дефектного и бездефектного состояния трансформаторов.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, диагностика, трансформаторное масло, пробивное напряжение, результаты периодических испытаний, статистический анализ, законы распределения, предельно допустимые значения, минимальный риск.

O. V. SHUTENKO, S. H. PONOMARENKO

CORRECTION OF TRANSFORMER OIL BREAKDOWN VOLTAGE MAXIMUM PERMISSIBLE VALUES BY THE MINIMUM RISK METHOD

The method of correction of maximum permissible values of breakdown voltage of transformer oils in order to minimize possible economic damage in case of making erroneous decisions during diagnostics of the condition of transformer oils according to the results of periodic tests is proposed. An algorithm for statistical processing of the periodic test results is described, the use of which allows forming arrays with homogeneous values of the indicators under a priori limited measuring information. Analysis of distribution laws of breakdown voltage values for the transformer oils suitable and unsuitable for operation according to the values of this indicator is done. According to the results of the analysis, it was found that the breakdown voltage values of oils with different states have Weibull distribution. It was determined that the values of mathematical expectations of breakdown voltage of serviceable oils with the ageing of transformer oils shifts to the area of low values. It means that the breakdown voltage maximum permissible values of oils for the given distributions should be different. It is confirmed by the previously known fact that for unimodal distributions, the maximum permissible values of indicators that provide a minimum of risk are in an interval bounded by the mathematical expectation of the indicator distributions with different states. A decisive rule is formulated and an average risk function is compiled to adjust the maximum permissible breakdown voltage values of transformer oils. Based on the minimisation of the average risk function by Newton's method, the maximum permissible values of the breakdown voltage of oils have been determined. The made comparative analysis has shown that the correction of maximum permissible

© О. В. Шутенко, С. Г. Пономаренко, 2020

values of breakdown voltage of oils allows decreasing the risk values by 1.52÷19.13 times in comparison with risks, which provide the use of maximum permissible values, regulated in standards. It was found that the maximum permissible values of the breakdown voltage of oils, providing a minimum value of average risk, are not constant. They vary depending on the values of faulty decision prices and the probabilities of occurrence of different defective and defect-free oil states of transformers.

Keywords: power transformers, diagnostics, transformer oil, breakdown voltage, periodic test results, statistical analysis, distribution laws, maximum permissible values, minimum risk.

Постановка проблеми. В умовах істотного старіння парку високовольтного маслонаповненого обладнання особливої актуальності набуває завдання забезпечення експлуатаційної надійності і, як наслідок, безперебійного і надійного електропостачання споживачів електричною енергією. Експлуатаційна надійність високовольтного маслонаповненого обладнання багато в чому визначається адекватністю і достовірністю методів, що використовуються для діагностики його стану. У більшості випадків оцінка стану обладнання виконується на основі порівняння виміряних значень показників з їх граничними або гранично допустимими значеннями (ГДЗ), які регламентовані діючими стандартами. Очевидно, що достовірність діагностики і, як наслідок, експлуатаційна надійність обладнання буде багато в чому залежати від того, наскільки адекватно ГДЗ показників враховують реальний стан обладнання, фізичні особливості процесів старіння ізоляції і вплив факторів, які впливають на обладнання в умовах тривалої експлуатації. Оскільки трансформаторне масло є одним з найважливіших елементів ізоляції високовольтних трансформаторів, а пробивна напруга характеризує здатність масла витримувати прикладену напругу без пробою, то в даній роботі запропоновано метод коригування ГДЗ пробивної напруги в трансформаторному маслі на основі мінімізації функції середнього ризику.

Аналіз публікацій. У більшості міжнародних і національних стандартів [1–4] оцінка стану трансформаторних масел здійснюється шляхом порівняння виміряних значень показників масла з їх ГДЗ. При цьому ГДЗ нормуються за класом напруги трансформаторів і сортом масла. Деякі компанії, наприклад, SDMyers (США) використовують багаторівневі системи контролю [5], в яких виділені три характерні області: область прийнятних значень показників якості масла, область погіршених значень показників якості і область неприйнятних показників якості. На додаток до вимог, регламентованих в [1–5], велика кількість публікацій присвячена удосконаленню методів оцінки стану трансформаторних масел. Комплексний аналіз існуючих методів діагностики стану трансформаторних масел наведено в [6–7]. У [8] для оцінки ступеня старіння масел використовувався термічний аналіз та інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є, що, на думку авторів, дозволяє виконувати оцінку стану трансформаторного масла на ранньому етапі. Аналогічний підхід використаний і в [9]. У [10] для ранньої діагностики стану масла запропонована нова технологія вимірювання флуоресцентного випромінювання, яка була експериментально зіставлена з іншими методами вимірювання (такими як метод титрування та інфрачервона спектроскопія) для перевірки її на предмет вимірювання окислення електроізоляційного масла. В [11] для оцінки стану масла розроблений метод абсорбційної спектроскопії на основі характеристики спектрального поглинання шляхом прийняття методу поглинання ультрафіолету. Не менше число досліджень присвячене вдосконаленню процедур прийняття рішень при оцінці стану трансформаторних масел. Наприклад, в [12, 13] для оцінки стану трансформаторних масел запропоновано використовувати поліноміальну модель. У [14] оцінка стану масел виконувалася з використанням методу траєкторій. У [15] запропонована стратегія технічного обслуговування силових трансформаторів, заснована на аналізі результатів випробувань масла і паперової ізоляції, яка призводить до мінімізації експлуатаційних ризиків. Однак, незважаючи на достатній обсяг публікацій, питання коригування ГДЗ показників масел висвітлені недостатньо, за винятком [16], що і послужило причиною для проведення даних досліджень.

Мета статті. В статті наведено опис методу коригування ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел, заснованого на мінімізації функції середнього ризику.

Метод досліджень. У теорії технічної діагностики [17] для визначення граничних значень діагностичних ознак розглядається кілька критеріїв:

1. *Критерій мінімального числа помилкових рішень*. При використанні даного критерію мінімізується ймовірність прийняття помилкових рішень. Якщо прийняти вирішальне правило, що діагностований об'єкт відноситься до справного стану, якщо значення показника не перевищує ГДЗ, і відноситься до несправного стану в іншому випадку, то ймовірність помилкових рішень визначається як:

$$P_{\text{пом}} = P_1 \int_{X_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right) dx + P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f\left(\frac{x}{D_2}\right) dx \ , \quad (1)$$

де $P_{\text{пом}}$ – імовірність прийняття помилкових рішень;

P_1 – імовірність справного стану аналізованого обладнання;

P_2 – імовірність несправного стану аналізованого обладнання;

$\int_{X_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right) dx$ – імовірність того, що при справному стані діагностованого обладнання значення показника буде перевищувати ГДЗ;

$P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f\left(\frac{x}{D_2}\right) dx$ – імовірність того, що при несправному стані діагностованого обладнання значення показника буде нижче ГДЗ;

$f\left(\frac{x}{D_1}\right)$ – функція щільності розподілу діагностичного показника для справного стану;

$f\left(\frac{x}{D_2}\right)$ – функція щільності розподілу діагностичного показника для несправного стану.

2) *Критерій мінімуму ризику*. При використанні даного критерію ГДЗ визначаються з умови мінімуму ризику. При використанні наведеного вище вирішального правила функція ризику, що підлягає мінімізації, має вигляд:

$$R = C_{21}P_1 \int_{X_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right)dx + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{X_0} f\left(\frac{x}{D_2}\right)dx, \quad (2)$$

де R – середній ризик;

C_{21} – умовна вартість ймовірності помилки першого роду (приймається рішення про несправний стан обладнання, коли має місце справний стан);

C_{12} – умовна вартість ймовірності помилки другого роду (приймається рішення про справний стан обладнання, в той час коли має місце несправний стан).

3) *Мінімаксний критерій.* Даний критерій призначений для ситуації, коли відсутні попередні статистичні відомості про ймовірність діагнозів. Розглядається «найгірший випадок», тобто найменш сприятливі значення:

$$R(x_0, P_1) = C_{21}P_1 \int_{X_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right)dx +$$

$$+C_{12}(1 - P_1) \int_{-\infty}^{X_0} f\left(\frac{x}{D_2}\right)dx. \quad (3)$$

4) *Критерій Неймана-Пірсона*. За методом Неймана-Пірсона мінімізується ймовірність помилки першого роду при заданому допустимому рівні ймовірності другого роду:

$$P_1 \int_{X_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right)dx \le A, \quad (4)$$

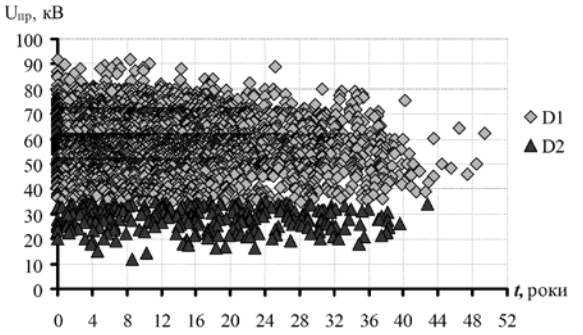
де A – заданий допустимий рівень ймовірності помилкової тривоги.

Вибір того чи іншого критерію проводиться з урахуванням конкретного завдання. При діагностиці стану високовольтних силових трансформаторів слід враховувати, що ціна помилки II-го роду багато вище, аніж ціна помилки I-го роду. В таких умовах граничні значення доцільніше визначати не з точки зору мінімізації загального числа помилкових рішень або ймовірностей одного з них, а з точки зору мінімізації можливого економічного збитку, яким супроводжується прийняття помилкового рішення. Тому в даній роботі в якості критерію для коригування ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел обраний критерій мінімуму середнього ризику.

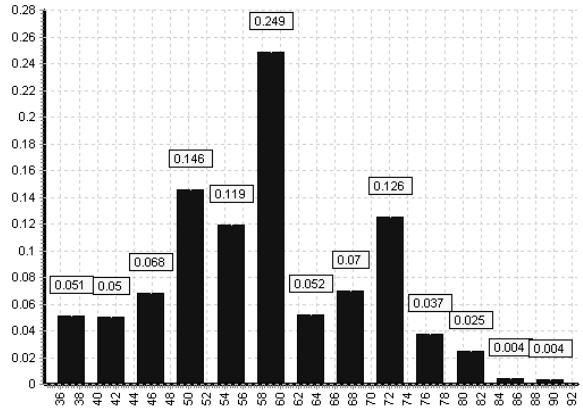
Оскільки практичне використання будь-якого з розглянутих критеріїв передбачає наявність інформації про закони розподілу діагностичної ознаки в обладнанні з різним станом, то завданням наступного етапу досліджень було дослідження законів розподілу трансформаторних масел.

Статистична обробка результатів періодичних випробувань. В якості вихідних даних були використані результати періодичного контролю пробивної напруги трансформаторних масел по 231 трансформатору напругою 110 кВ з 6 областей України. Загальний обсяг вибірки склав 3723 значення. Залежно від результатів періодичних випробувань масив вихідних даних був розбитий на два масиви: придатне до експлуатації масло і не придатне до експлуатації масло. Використовуючи основні терміни з теорії технічної діагностики [17], позначимо масив даних, що складається з результатів випробувань для придатного до експлуатації масла, за значеннями пробивної напруги як D_1, а масив даних, що складається з результатів випробувань для не придатного до експлуатації масла, як D_2. Обсяг вибіркових значень для масиву D_1 склав 3348 значень, а для масиву D_2 – 375 вибіркових значень.

Оскільки результати випробувань отримані в різних лабораторіях, а аналізовані трансформатори мають різний термін служби, експлуатуються з різним завантаженням, залиті різними сортами масел, то очевидно, що швидкість зниження пробивної напруги масла в аналізованих трансформаторах істотно різниться. Тобто вихідні дані є статистично неоднорідними. У цьому легко переконатися, проаналізувавши залежність пробивної напруги трансформаторних масел від тривалості експлуатації, яка наведена на рис. 1 (*а*) і гістограму емпіричного розподілу пробивної напруги масел, побудовану для даних з масиву D_1, яка наведена на рис. 1 (*б*). Як видно з рис. 1 (*а*), вихід значень пробивної напруги масел за межі допустимих значень спостерігається практично з моменту введення силових трансформаторів в експлуатацію. Аналогічна картина спостерігається і для значень пробивної напруги придатного до експлуатації масла. Відносно високі значення пробивної напруги можуть мати місце при великих значеннях тривалості експлуатації, а низькі значення даного показника були отримані при невеликому терміні служби. З одного боку це обумовлено різною швидкістю старіння масел, а з іншого – наявністю похибок і грубих промахів в результатах випробувань. Неоднорідність вихідних даних призводить до спотворення гістограми емпіричного розподілу (рис. 1 (*б*)), що не дозволяє виконати оцінку законів розподілу пробивної напруги трансформаторних масел з різним станом. У зв'язку з цим виникає завдання формування однорідних масивів пробивної напруги трансформаторних масел.



а



б

Рисунок 1 – Залежність пробивної напруги трансформаторних масел від тривалості експлуатації (*а*) для масиву вихідних даних і відповідна їй гістограма емпіричного розподілу (*б*)

Як показано в [14], використання формального підходу, заснованого на формуванні однорідних масивів даних за критерієм тривалості експлуатації або за типом, номінальною потужністю трансформаторів, без урахування завантаження трансформаторів (яка не завжди відома) не дозволяє сформувати масиви однорідних даних. У [18] для формування однорідних масивів діагностичних показників в умовах обмеженості апріорної інформації про режими роботи обладнання запропоновано використовувати підхід, заснований на перевірці статистичних гіпотез. Формування масивів з однорідними результатами періодичних випробувань виконувалося шляхом використання трьох статистичних критеріїв [19]:

1) ранговий непараметричний критерій Вілкоксона (*W*) – для перевірки статистичної гіпотези про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок:

$$W = \sum_{i=1}^{n} s(r_i), \qquad (5)$$

де r_i – ранги діагностичних ознак в загальному варіаційному ряду;

$s(r_i)$ – одна з можливих $N!$ перестановок рангу r_i.

2) Z-критерій – для перевірки статистичної гіпотези про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок:

$$Z_{\text{спост}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{D_1}{n} + \frac{D_2}{m}}}, \qquad (6)$$

де $\bar{x}_1$– вибіркове середнє значення діагностичної ознаки, розраховане за результатами випробувань першого трансформатора;

$\bar{x}_2$– вибіркове середнє значення діагностичної ознаки, розраховане за результатами випробувань другого трансформатора;

D_1 – вибіркова дисперсія діагностичної ознаки, розрахована за результатами випробувань першого трансформатора;

D_2 – вибіркова дисперсія діагностичної ознаки, розрахована за результатами випробувань другого трансформатора;

n – число спостережень діагностичної ознаки для першого трансформатора;

m – число спостережень діагностичної ознаки для другого трансформатора.

3) критерій Фішера-Снедекора (*F*) для перевірки статистичної гіпотези про рівність дисперсій двох незалежних вибірок:

$$F_{\text{спост}} = \frac{\delta^2_{max}}{\delta^2_{min}}, \qquad (7)$$

де δ^2_{max} – значення максимальної вибіркової дисперсії;

δ^2_{min} – значення мінімальної вибіркової дисперсії.

Дві незалежні вибірки вважалися однорідними, якщо при заданому рівні значущості $\alpha = 0{,}05$ за результатами тестування не відкидалися статистичні гіпотези:

- про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок ($W_1 > W_{n1,\,n2,\,0{,}025}$, $W_2 < W_{n1,\,n2,\,0{,}975}$);
- про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок ($Z_{\text{набл}} < Z_{\text{крит},\,0{,}95}$);
- про рівність дисперсій двох незалежних вибірок ($F_{\text{набл}} < F_{(n1-1),\,(n2-1),\,0{,}95}$).

Як показано в [20–21], використання такого підходу, стосовно до діагностичних ознак різної фізичної природи, дозволяє сформувати масиви з однорідними значеннями показників, навіть в умовах обмеженості вимірювальної інформації. Наведений алгоритм статистичної обробки результатів випробувань був реалізований у вигляді авторської програми «ODNORODN» [22], яка дозволяє істотно скоротити час, необхідний для статистичної обробки вихідних даних. Використання програми «ODNORODN» стосовно масиву значень пробивної напруги придатного до експлуатації масла дозволило сформувати 4 масиви значень пробивної напруги з близькими значеннями вибіркових середніх, вибіркових дисперсій і подібними законами розподілів.

Для обробки значень пробивної напруги не придатного до експлуатації масла був використаний підхід, заснований на виділенні грубих промахів з числа однотипних вимірювань. Для цих цілей був використаний критерій Ірвіна [19], який може застосовуватися для випадку, коли закон розподілу випадкової величини невідомий або відрізняється від нормального. Для цих цілей значення пробивної напруги з масиву D_2 були відсортовані за спаданням, після чого оцінювалися «підозрілі» значення пробивної напруги по краях варіаційного ряду. Значення критерію Ірвіна визначалося як:

$$\eta_{\text{розр}} = \frac{(x_k - x_{k\ \text{попер.}})}{S}, \tag{8}$$

де x_k – підозріле значення;

$x_{k\ \text{попер.}}$ – попереднє значення у варіаційному ряді.

Отримане розрахункове значення критерію Ірвіна порівнювалось із табличним $\eta_{\text{табл}}$. Якщо $\eta_{\text{розр}} > \eta_{\text{табл}}$, тоді розглянуте значення відкидалось і перевірялося наступне. Перевірка продовжувалась, поки не було одержано $\eta_{\text{розр}} < \eta_{\text{табл}}$.

Обсяг вибіркових значень N, значення вибіркового середнього M_x, вибіркової дисперсії D_x, а також коефіцієнтів асиметрії j_a і ексцесу j_e для масивів даних, отриманих в ході статистичної обробки для придатного до експлуатації масла (D_{11}–D_{14}) і не придатного до експлуатації масла (D_2), наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики однорідних масивів пробивної напруги

Масив	N	M_x	D_x	j_a	j_e
D_{11}	204	71,066	124,016	-0,658	3,038
D_{12}	378	67,477	144,713	-0,721	3,708
D_{13}	887	57,626	182,132	-0,431	2,777
D_{14}	680	49,259	142,046	-0,079	2,730
D_2	275	27,647	19,814	-0,653	3,083

Як видно з табл. 1, значення математичних очікувань пробивної напруги масел, навіть для нормального стану (масиви D_{11}–D_{14}), значимо відрізняються, що свідчить як про різну якість трансформаторного масла, так і про різну інтенсивність старіння масел, тобто про наявність відмінностей в режимах експлуатації трансформаторів. Математичне очікування пробивної напруги трансформаторного масла для масиву D_2 (масло не придатне до експлуатації за значенням пробивної напруги) має найнижчі значення. Для всіх 5 масивів виявлена негативна асиметрія, що свідчить про те, що «довга частина» кривої розподілу розташована зліва від математичного очікування. Позитивне значення коефіцієнта ексцесу говорить про те, що крива розподілу має більш високу і «гостру» вершину, ніж крива нормального закону. Отримані емпіричні значення коефіцієнтів асиметрії і ексцесу побічно свідчать про те, що розподіли пробивної напруги масла як для придатного до експлуатації масла, так і для масла з низьким значенням пробивної напруги можуть відрізнятися від нормального закону.

Аналіз законів розподілу пробивної напруги трансформаторних масел з різним станом. Для перевірки гіпотези про відповідність теоретичного закону розподілу емпіричним даним була використана програма «ZR», розроблена на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» [22]. Дана програма дозволяє розбити діапазон зміни випадкової величини на інтервали, для чого за замовчуванням використовується формула Стерджеса:

$$L = 1 + 3{,}322 \cdot \lg N, \tag{9}$$

де N – обсяг вибіркових значень.

У разі необхідності користувач може сам задати необхідне число інтервалів. Далі будується гістограма емпіричного розподілу. Після чого за вибірковими значеннями виконується оцінка параметрів для таких законів розподілу: нормальний, бета-розподіл, експоненційний, екстремальний, гамма-розподіл, Лапласа, логістичний, логарифмічний нормальний, Релея, Вейбула, Парето. Для кожного з 11 законів розподілу виконується перевірка відповідності теоретичного закону розподілу емпіричним даним. Для цього використовувалися два статистичних критерії [19]:

1) Критерій χ^2 Пірсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}, \tag{10}$$

де n_i – значення емпіричних частот;

n_i' – значення теоретичних частот;

k – кількість інтервалів.

Для перевірки основної гіпотези обчислюється вибіркове значення критерію χ^2 і по таблиці критичних точок розподілу критерію χ^2, по заданому рівню значущості α і числу ступенів свободи f визначається критична точка $\chi^2_{\text{крит}}(\alpha, f)$.

Число ступенів свободи f визначається як:

$$f = k - 1 - r,$$

де k – число груп (часткових інтервалів) вибірки;

r – число параметрів передбачуваного розподілу, які оцінені за даними вибірки.

Якщо розрахункове значення критерію χ^2 менше критичного, то основна гіпотеза (генеральна сукупність розподілена за цим законом) не відкидається. Якщо розрахункове значення критерію χ^2 більше критичного, то основна гіпотеза відкидається.

2) Критерій Колмогорова-Смирнова:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \tag{11}$$

де $F_n(x)$ – емпірична функція розподілу;

$F(x)$ – теоретична функція розподілу.

Основна гіпотеза (генеральна сукупність розподілена за цим законом) відкидається, якщо $\sqrt{n} \cdot D_N$ перевищує квантиль розподілу $K\alpha$ заданого рівня значущості α, і не відкидається в іншому випадку.

Виконаний за допомогою програми аналіз показав, що значення пробивної напруги масла незалежно від його стану може бути описане розподілом Вейбула. Значення параметрів закону розподілу Вейбула, а також розрахункові і критичні значення (при α = 0,05) критеріїв Пірсона і Колмогорова-Смирнова наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення параметрів закону розподілу Вейбула, а також розрахункові і критичні значення (при α = 0,05) критеріїв Пірсона і Колмогорова-Смирнова

Масив	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона			Значення критерію Колмогорова-Смирнова	
	α	β	f	$\chi^2_{розр.}$	$\chi^2_{крит.}$	$\lambda_{розр.}$	$\lambda_{крит.}$
D_{11}	75,62	7,52	5	6,590	11,1	0,601	1,36
D_{12}	72,29	6,56	3	6,303	7,82	0,617	1,36
D_{13}	62,74	4,88	8	15,41	15,5	0,601	1,36
D_{14}	53,74	4,7	6	5,835	12,6	0,398	1,36
D_2	29,46	7,31	4	3,162	9,49	0,355	1,36

Як видно з табл. 2, розрахункові значення критеріїв згоди для всіх п'яти аналізованих масивів даних не перевищують критичні значення при рівні значущості α = 0,05 і відповідному значенні ступенів свободи, що не дозволяє відкинути гіпотезу про прийнятність розподілу емпіричних даних пробивної напруги трансформаторних масел – закону розподілу Вейбула.

Щільність розподілу Вейбула має вигляд:

$$p(x,\alpha,\beta) = \frac{\beta}{\alpha^{\beta}} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}, \qquad (12)$$

де α, β – параметри закону розподілу, інтерпретовані відповідно як параметр масштабу і параметр форми.

На рис. 2 наведені гістограми емпіричних розподілів і функції щільності теоретичних розподілів Вейбула для придатного до експлуатації (рис. 2 *а*) і не придатного до експлуатації масла (рис. 2 *б*).

Коригування ГДЗ пробивної напруги масла методом мінімального ризику. Отримані параметри законів розподілу пробивної напруги масел з різним станом дозволяють використовувати метод мінімального ризику для коригування ГДЗ даного показника.

а

б

Рисунок 2 – Гістограма емпіричного розподілу і функція щільності розподілу Вейбула для пробивної напруги масла: *а* – масло придатне до експлуатації (масив D_{13}); *б* – масло не придатне до експлуатації (масив D_2)

Оскільки при оцінці стану масел за значенням пробивної напруги масло визнається непридатним до експлуатації, якщо виміряні значення пробивної напруги менше ГДЗ [1–4], то вирішальне правило має вигляд:

$$U_{\text{пр}} \in D_1 \text{ при } U_{\text{пр}} > U_{\text{пр г.д.}},$$

$$U_{\text{пр}} \in D_2 \text{ при } U_{\text{пр}} < U_{\text{пр г.д.}}, \qquad (13)$$

де D_1 – придатне до експлуатації масло;

D_2 – непридатне до експлуатації масло;

$U_{\text{пр г.д}}$ – ГДЗ пробивної напруги масла.

Даному правилу відповідає і взаємне розташування теоретичних щільностей розподілу пробивної напруги трансформаторних масел, відображене на рис. 3. Пунктирною лінією позначено ГДЗ пробивної напруги, регламентоване в Україні.

Як видно з рис. 3, значення математичних очікувань пробивної напруги придатного до експлуатації масла (D_{11}–D_{14}) зі старінням трансформаторних масел зсуваються в область низьких значень. З чого випливає, що ГДЗ пробивної напруги масел для даних розподілів повинні відрізнятися.

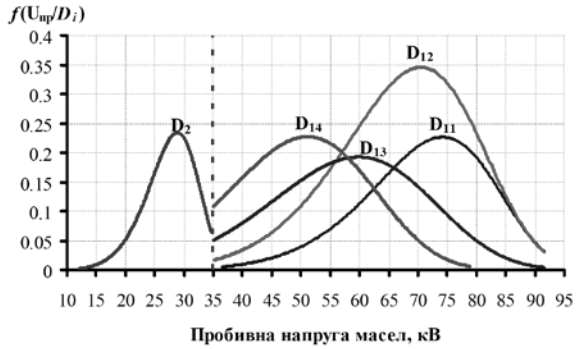


Рисунок 3 – Щільності теоретичного розподілу пробивної напруги трансформаторних масел з різним станом

Враховуючи вирішальне правило (13) і щільності розподілу Вейбула (12), вираз для середнього ризику (1) матиме вигляд:

$$R = C_{21}P_1 \int_{U_{\text{г.д.}}}^{\infty} \frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} \cdot U_{\text{пр}}^{\beta_1 - 1} \cdot e^{-\left(\frac{U_{\text{пр}}}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}} dU_{\text{пр}} +$$

$$+C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{U_{\text{г.д.}}} \frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} \cdot U_{\text{пр}}^{\beta_2 - 1} \cdot e^{-\left(\frac{U_{\text{пр}}}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} dU_{\text{пр}}, \qquad (14)$$

де α_1, β_1 – значення параметрів масштабу і форми для розподілу значень пробивної напруги для придатного до експлуатації масла;

α_2, β_2 – значення параметрів масштабу і форми для розподілу значень пробивної напруги для не придатного до експлуатації масла;

$U_{\text{г.д.}}$ – ГДЗ пробивної напруги масла, що підлягає визначенню.

Відомо [17], що мінімальне значення функції середнього ризику забезпечують значення параметра $U_{\text{г.д.}}$, для яких виконуються дві умови:

$$\frac{dR}{dU_{\text{г.д.}}} = 0 \text{ і } \frac{d^2R}{d\text{tg}\delta_{\text{гр}}^2} > 0. \qquad (15)$$

Враховуючи, що точне аналітичне рішення для функції (14) з умовами (15) відсутне, для визначення ГДЗ $U_{\text{г.д.}}$ був використаний метод Ньютона [23]. Згідно [17], для одномодальних розподілів (в тому числі і для розподілу Вейбула) граничне значення, що забезпечує мінімум ризику, знаходиться між математичними очікуваннями щільності розподілів двох станів, що значно спрощує процес розрахунку. Виконаний аналіз показав, що дана тенденція має місце і для пробивної напруги трансформаторних масел. Як приклад, на рис. 4 наведена залежність величини середнього ризику від значень пробивної напруги масла, розрахована для масиву придатного до експлуатації масла D_{11} при значеннях $P_1 = 0{,}95$, $P_2 = 0{,}05$, $C_{21} = 1$ і $C_{12} = 100$. Пунктирними лініями на рисунку позначені значення математичних очікувань пробивної напруги масла з різним станом, які для розподілу Вейбула визначалися як:

$$m = \alpha_i \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_i}\right), \qquad (16)$$

де α_i, β_i – значення параметрів масштабу і форми пробивної напруги масел для розподілу Вейбула;

$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt$ – гамма-функція Ейлера.

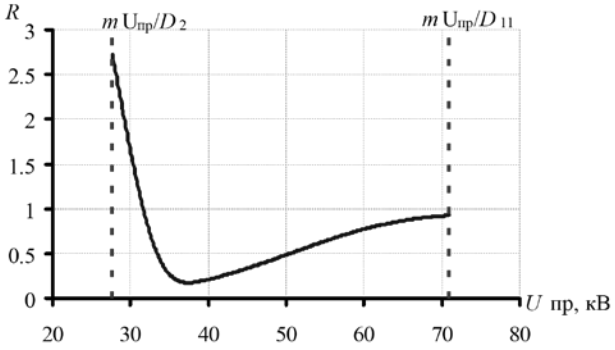


Рисунок 4 – Залежність величини середнього ризику від значень пробивної напруги

Як видно з рис. 4, наведена залежність має чітко виражений мінімум, який відповідає певному значенню пробивної напруги. У табл. 3 наведені ГДЗ пробивної напруги, що забезпечують мінімум ризику, отримані при значеннях $P_1 = 0{,}95$, $P_2 = 0{,}05$, $C_{21} = 1$ і $C_{12} = 100$. Там же наведені значення ймовірностей правильних (P_{11}, P_{22}) і помилкових рішень (P_{21}, P_{12}), а також значення середнього ризику (R), які супроводжують використання отриманих ГДЗ.

Таблиця 3 – ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел, отримані методом мінімального ризику, значення ймовірностей правильних і помилкових рішень, а також значення середнього ризику

Масив	$U_{\text{г.д.}}$	P_{11}	P_{21}	P_{22}	P_{12}	R
D_{11}	39,6	0,992	0,008	0,9998	0,0002	$8{,}1\ 10^{-3}$
D_{12}	39,0	0,982	0,018	0,9996	0,0004	0,018
D_{13}	38,0	0,9167	0,0833	0,9984	0,0016	0,0869
D_{14}	37,4	0,833	0,167	0,996	0,004	0,174

Як видно з табл. 3, ГДЗ трансформаторних масел, що забезпечують мінімум економічного збитку в разі прийняття помилкових рішень, відрізняються для різних масивів даних. При цьому вони перевищують значення 35 кВ, яке регламентовано в якості ГДЗ в [2–4]. Також з табл. 3 легко побачити, що з погіршенням властивостей масел (зниження значень математичних очікувань пробивної напруги придатних до експлуатації масел від масиву D_{11} до масиву D_{14}) спостерігається зменшення значення ймовірностей прийняття правильних рішень (P_{11} і P_{22}) і, як наслідок, збільшення значення середнього ризику. Тобто ризик зростає зі зниженням значення пробивної напруги, що є цілком логічним висновком.

Оскільки отримані ГДЗ пробивної напруги тільки мінімізують значення можливого ризику, але не усувають його повністю, то становить інтерес порівняння значень середнього ризику, який супроводжується використанням отриманих ГДЗ, з ризиками, які супроводжуються використанням ГДЗ пробивної напруги масел, що регламентуються національними та міжнародними стандартами [2–4]. Значення ймовірностей правильних (P_{11}, P_{22}) і помилкових рішень (P_{21}, P_{12}), а також значення середнього ризику (R), які мають місце при використанні ГДЗ пробивної напруги масел, що регламентуються в стандартах [2–4], стосовно аналізованих масивів наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Значення ймовірностей правильних і помилкових рішень, а також значення середнього ризику при використанні ГДЗ пробивної напруги масел, що регламентуються в стандартах [2–4]

Масив	P_{11}	P_{21}	P_{22}	P_{12}	R
D11	0,996	0,004	0,9706	0,0294	0,155
D12	0,991	0,009	0,9706	0,0294	0,157
D13	0,943	0,057	0,9706	0,0294	0,200
D14	0,875	0,125	0,9706	0,0294	0,265

Порівнюючи значення ризиків з табл. 3 і 4, легко побачити, що коригування ГДЗ пробивної напруги масел дозволяє знизити значення ризиків в 1,52÷19,13 разів порівняно з ризиками, які забезпечують використання ГДЗ, регламентованих у стандартах [2–4].

Отримані ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел є «точковими», оскільки забезпечують мінімум ризику тільки для заданих значень цін помилкових рішень, ймовірностей станів і параметрів законів розподілів. На практиці і значення ймовірностей діагнозів, і значення цін помилкових рішень, і значення параметрів розподілів можуть змінюватися в широких межах. У зв'язку з цим представляє безпосередній інтерес виконання аналізу впливу цих параметрів на ГДЗ пробивної напруги масел. При виконанні даного аналізу в якості параметрів законів розподілу були використані значення для параметрів масштабу і форми для масиву D_{11}, які наведені в табл. 2. Задаючись замість значень цін помилкових рішень значеннями їх відношень C_{12}/C_{21} (відношення ціни помилки II-го роду до ціни помилки I-го роду) і приймаючи, що $C_{21} = 1$, і вважаючи, що $P_2 = 1 - P_1$, були розраховані ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел в залежності від ймовірності P_1. На рис. 5 наведені залежності ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел від значення ймовірності P_1 (ймовірність того, що масло буде придатне до експлуатації за значеннями пробивної напруги), при різних значеннях відношень цін помилкових рішень.

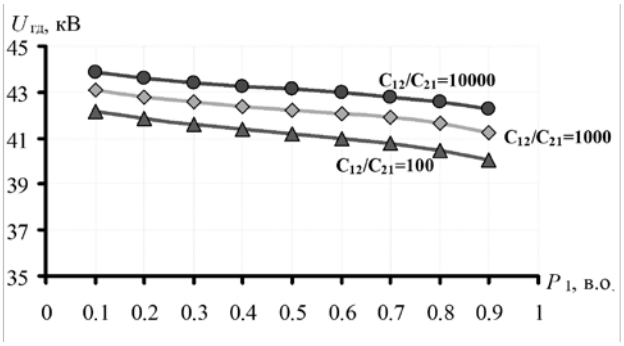


Рисунок 5 – Залежність ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімум ризику від ймовірності P_1

Як видно з рис. 5, з ростом ймовірності P_1 ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімум ризику, знижуються. З ростом ціни помилки II-го роду по відношенню до ціни помилки I-го роду залежності зміщуються в область більш високих значень пробивної напруги масел.

Аналогічні залежності ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел, але від умовних вартостей помилкових рішень наведені на рис. 6.

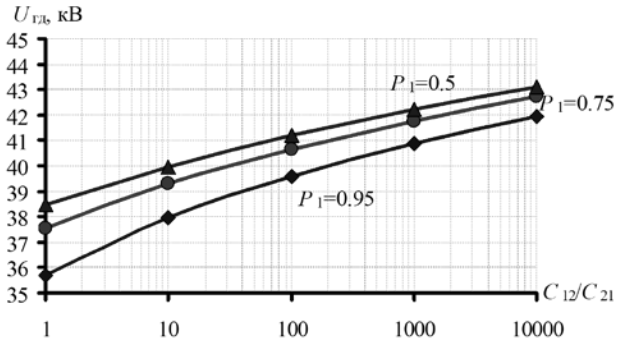


Рисунок 6 – Залежність ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімум ризику від умовних цін помилкових рішень

З рис. 6 видно, що при зростанні відношення ціни помилки II-го роду до ціни помилки I-го роду ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімум ризику зростають. З ростом ймовірності P_1 залежності зміщуються в область більш високих значень пробивної напруги масел.

Наведені результати показують, що ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімальне значення середнього ризику, не є постійними. Вони змінюються в залежності від значень цін помилкових рішень і ймовірностей появи різних станів масла. Таким чином, коригування ГДЗ пробивної напруги масел, з метою мінімізації можливого економічного збитку, повинне виконуватися з урахуванням даних факторів.

Висновки. Виконаний аналіз законів розподілу значень пробивної напруги для придатних і непридатних до експлуатації масел за значеннями даного показника дозволив встановити, що незалежно від стану масел розподіли пробивної напруги можуть бути описані законом розподілу Вейбула.

На підставі аналізу значень коефіцієнтів масштабу і форми для розподілів пробивної напруги масел з різним станом встановлено, що значення математичних очікування пробивної напруги придатних до експлуатації масел зі старінням трансформаторних масел зсуваються в область низьких значень. З чого випливає, що ГДЗ пробивної напруги масел для даних розподілів повинні відрізнятися.

Запропоновано метод для коригування ГДЗ пробивної напруги масел з метою мінімізації можливого економічного збитку в разі прийняття помилкових рішень. Даний метод відрізняється тим, що ГДЗ пробивної напруги трансформаторних масел визначаються шляхом мінімізації функції середнього ризику. Наведений підхід дозволяє отримати ГДЗ пробивної напруги масел з урахуванням сорту і якості трансформаторних масел, використовуваних в конкретному обладнанні енергетичних компаній, умов експлуатації цього обладнання та ряду інших факторів.

Виконаний порівняльний аналіз показав, що коригування ГДЗ пробивної напруги масел дозволяє знизити значення ризиків в 1,52÷19,13 разів у порівнянні з ризиками, які забезпечують використання ГДЗ, регламентованих у стандартах.

Виконаний аналіз показав, що ГДЗ пробивної напруги масел, що забезпечують мінімальне значення середнього ризику, не є постійними. Вони змінюються в залежності від значень цін помилкових рішень і ймовірностей появи різних станів масла, дефектного і бездефектного стану трансформаторів. Таким чином, коригування ГДЗ пробивної напруги масел, з метою мінімізації можливого економічного збитку, повинне виконуватися з урахуванням даних факторів.

Список літератури

1. *IEC 60422:2013. Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013. 93 p.
2. *IEEE Std C57.106–2015. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. 38 p.
3. *СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання*. ПАТ «Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО», 2020. 238 с.
4. *СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования*. ПАО «Россети», 2017. 262 с.
5. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
6. Islam M., Lee G., Hettiwatte S. N. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*. 2018. Vol. 100, no. 2. P. 581–605. doi: 10.1007/s00202-017-0532-4
7. N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y., Beroual A. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 5. P. 367. doi: 10.3390/en9050367
8. Degeratu, S., Rotaru, P., Rizescu, S., Danoiu S., Bizdoaca N. G., Alboteanu L. I., Manolea H. O. Condition monitoring of transformer oil using thermal analysis and other techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. No. 2015. P. 1679–1692. doi: 10.1007/s10973-014-4276-3
9. Fofana I., Bouaïcha A., Farzaneh M. Characterization of aging transformer oil–pressboard insulation using some modern diagnostic techniques. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. Vol. 21, no. 1. P. 1110–1127. doi: 10.1002/etep.499
10. Wicaksono B., Kong H., Markova L. V., Han H.-G. Application of fluorescence emission ratio technique for transformer oil monitoring. *Measurement*. 2013. Vol. 46, no. 10. P. 4161–4165. doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.033
11. Hussain K., Karmakar S. Condition assessment of transformer oil using UV-Visible spectroscopy. *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*. Guwahati, India. 2014. P. 1–5. doi: 10.1109/NPSC.2014.7103841
12. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019. Vol. 47, no. 4–5. P. 406–419. doi: 10.1080/15325008.2019.1604848
13. Бондаренко В. Е., Щапов П. Ф., Шутенко О. В. *Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел [Монография]*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 452 с.
14. Бондаренко В. Е., Шутенко О. В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени старения трансформаторных масел. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2009. No. 1. С. 17–21.
15. Suwanasri T., Phadungthin R., Suwanasri C. Asset management of power transformer practical experience in Thailand. *17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2011)*. Hannover, Germany. 2011. Vol. 2011. P. 22–26.
16. Azis N., Zhou D., Wang Z. D., Jones D., Wells B., Wallwork G. M. Operational condition assessment of in-service distribution transformers. *2012 IEEE International Conference on Condition and Diagnosis*. Bali, Indonesia. 2012. P. 1156–1159. doi: 10.1109/CMD.2012.6416364
17. Биргер И. А. *Техническая диагностика*. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
18. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Техника и электрофизика высоких напряжений*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. № 60 (1033). С. 136–150.
19. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Москва: Высшая школа, 1977. 479 с.
20. Шутенко О. В., Баклай Д. М. Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі високовольтних трансформаторів негерметичного виконання. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. № 24. С. 102–117.
21. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-fillled bushings of hermetic and non-hermetic execution. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 4, no. 1 (42). P. 30–39. doi: 10.15587/2312-8372.2018.140873.
22. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных. Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. 268 с.
23. Черноруцкий И. Г. *Методы принятия решений*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

References (transliterated)

1. *IEC 60422:2013. Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2013. 93 p.
2. *IEEE Std C57.106–2015. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. 38 p.
3. *SOU-N EE 20.302:2020. Normy vyprobuvannya elektroobladnannya* [Company Standard 20.302:2020. Test standards for electrical equipment]. PrJSC National Power Company Ukrenergo, 2020. 238 p.
4. *STO 34.01-23.1-001-2017. Ob"em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya* [Company Standard34.01-23.1-001-2017.

Scope and standards for testing electrical equipment]. PJSC “Rosseti”, 2017. 262 p.
5. Alekseev B. A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* [Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 261 p.
6. Islam M., Lee G., Hettiwatte S. N. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*. 2018, Vol. 100, no. 2, pp. 581–605. doi: 10.1007/s00202-017-0532-4
7. N’cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y., Beroual A. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *Energies*. 2016, Vol. 9, no. 5, pp. 367. doi: 10.3390/en9050367
8. Degeratu, S., Rotaru, P., Rizescu, S., Danoiu S., Bizdoaca N. G., Alboteanu L. I., Manolea H. O. Condition monitoring of transformer oil using thermal analysis and other techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015, no. 2015, pp. 1679–1692. doi: 10.1007/s10973-014-4276-3
9. Fofana I., Bouaïcha A., Farzaneh M. Characterization of aging transformer oil–pressboard insulation using some modern diagnostic techniques. *European Transactions on Electrical Power*. 2011, vol. 21, no. 1, pp. 1110–1127. doi: 10.1002/etep.499
10. Wicaksono B., Kong H., Markova L. V., Han H.-G. Application of fluorescence emission ratio technique for transformer oil monitoring. *Measurement*. 2013, vol. 46, no. 10, pp. 4161–4165. doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.033
11. Hussain K., Karmakar S. Condition assessment of transformer oil using UV-Visible spectroscopy. *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*. Guwahati, India. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/NPSC.2014.7103841
12. Gouda O. E., El Dein A. Z. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019, Vol. 47, no. 4-5, pp. 406–419. doi: 10.1080/15325008.2019.1604848
13. Bondarenko V. E., Shchapov P. F., Shutenko O. V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornykh masel [Monografiya]* [Improving the efficiency of in-service measuring control of transformer oils [Monograph]]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2007. 452 p.
14. Bondarenko V. E., Shutenko O. V. Usovershenstvovanie protsedury prinyatiya resheniy pri otsenke stepeni stareniya transformatornykh masel [Improved decision-making procedure for assessing the ageing of transformer oils]. *ELEKTRO. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2009, no. 1, pp. 17–21.
15. Suwanasri T., Phadungthin R., Suwanasri C. Asset management of power transformer practical experience in Thailand. *17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2011)*. Hannover, Germany. 2011, vol. 2011, pp. 22–26.
16. Azis N., Zhou D., Wang Z. D., Jones D., Wells B., Wallwork G. M. Operational condition assessment of in-service distribution transformers. *2012 IEEE International Conference on Condition and Diagnosis*. Bali, Indonesia. 2012, pp. 1156-1159. doi: 10.1109/CMD.2012.6416364
17. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.
18. Shutenko O. V., Baklay D. N. Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ekspluatatsionnykh ispytaniy pri issledovanii zakonov raspredeleniya rezul'tatov khromatograficheskogo analiza rastvorennykh v masle gazov [Particularities of statistical processing of in-service test results when investigating the distribution laws of chromatographic analysis of dissolved gases in oil]. *Visnyk Natstekhn. un-tu «KhPI»: zb. nauk. pr. Temat. vyp.: Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”: a collection of scientific papers. Thematic issue: High voltage engineering and electrophysics]. Kharkiv, NTU ″KhPI″ Publ., 2013, no. 60 (1033), pp.136–150.
19. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 479 p.
20. Shutenko O. V., Baklay D. M. Analiz zakoniv rozpodilu kontsentratsiy haziv, rozchynenykh u masli vysokovol'tnykh transformatoriv nehermetychnoho vykonannya [The analysis of laws of distribution of concentration of the gases dissolved in oil of high-voltage transformers of not hermetically sealed execution]. *Visnyk Natstekhn. un-tu «KhPI»: zb. nauk. pr. Temat. vyp.: Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”: a collection of scientific papers. Thematic issue: Energetics: reliability and energy efficiency]. Kharkiv, NTU ″KhPI″ Publ., 2014, no. 24, pp. 102–117.
21. Shutenko O., Zagaynova A., Serdyukova G. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-fillled bushings of hermetic and non-hermetic execution. *Technology audit and production reserves*. 2018, vol. 4, no. 1 (42), pp. 30–39. doi: 10.15587/2312-8372.2018.140873.
22. Shutenko O. V., Baklay D. N. *Planirovanie eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh* [Planning experimental studies in the electricity sector. Methods of processing experimental data]. Kharkiv, NTU ″KhPI″ Publ., 2013. 268 p.
23. Chernorutskiy I. G. *Metody prinyatiya resheniy* [Decision-making methods]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 416 p.

Надійшла (received) 18.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шутенко Олег Володимирович (Шутенко Олег Владимирович, Shutenko Oleg Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3141-7709; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

Пономаренко Сергій Григорович (Пономаренко Сергей Григорьевич, Ponomarenko Serhii Hryhorovych) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7860-079X; e-mail: PonomarenkSerhii@gmail.com.