

М. П. Розводюк¹
 В. С. Вдовиченко¹
 К. М. Розводюк¹

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕМПІРИЧНОГО ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ВИХОДУ З ЛАДУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЧЕРЕЗ ПОШКОДЖЕННЯ ОБМОТОК

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто ідентифікацію закону розподілу за статистичними даними виходу з ладу силових трансформаторів 6—10 кВ через пошкодження їх обмоток за трирічний період: з 2018 по 2020 роки.

За статистичними даними встановлено, що спостерігається тенденція щодо зменшення пошкоджень силових трансформаторів майже в два рази. Але кількість цих відмов все одно залишається достатньо великою. Основною причиною відмов силових трансформаторів є пошкодження їхніх обмоток, що становить 82,17 % відносно інших причин. Тому взято для дослідження саме статистику, що характеризує вихід з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток.

Встановлено, що у 2018 та 2019 роках найбільша кількість пошкоджень обмоток силових трансформаторів припадала на квітень—липень з піком у червні, а у 2020 році максимум пошкоджень зафіксовано в листопаді та грудні.

Передумовою побудови математичних моделей прогнозування виходу з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток з метою забезпечення необхідної кількості запасних частин для їхнього швидкого відновлення є дослідження характеру виходу з ладу трансформаторів. Під час вирішення поставлених завдань використовувалися методи: пасивний експеримент — для збору інформації про вихід з ладу силових трансформаторів; статистичний аналіз — для побудови емпіричного закону розподілу.

Проаналізувавши вигляд гістограми варіаційного ряду вибірки виходу з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток висунуто гіпотезу про логарифмічний нормальний закон розподілу виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток. Для її перевірки використано χ^2 -критерій Пірсона. В результаті дослідження підтверджено висунуту гіпотезу. Використовуючи таблиці Стьюдента та таблицю χ^2 -розподілу з довірчою імовірністю $\gamma = 0,98$ визначено довірчі інтервали для статистичних оцінок середнього значення, дисперсії та середньоквадратичного відхилення, які характеризують вихід з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток.

У подальших дослідженнях можна побудувати математичні моделі прогнозування виходу з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток.

Ключові слова: силовий трансформатор, пошкодження обмоток, статистичний аналіз, закон розподілу

Вступ

Силові масляні трансформатори сьогодні експлуатуються за технічним станом, а не відповідно до їхнього терміну служби, гарантованого заводом-виробником [1]—[4]. Тому наявність частих поломок, а як наслідок — відключення споживачів, є справою звичною. Питання діагностування силових трансформаторів висвітлено в роботах [5]—[8]. Однак цікавим є й питання прогнозування виходу з ладу силових трансформаторів з метою забезпечення необхідної кількості запасних частин для їхнього швидкого відновлення. А передумовою цього є дослідження характеру виходу з ладу трансформаторів.

Для дослідження взято силові масляні трансформатори 6—10 кВ, що використовуються на трансформаторних підстанціях Вінницької області.

Динаміка пошкоджень силових трансформаторів 6—10 кВ з 2016 по 2020 рік показана на рис. 1. Як видно, динаміка є позитивною: за чотири роки кількість пошкоджень зменшилася майже

в два рази, але все ж бажане ще більше поліпшення.

Причини виходу з ладу трансформаторів можна класифікувати за такими ознаками: пошкодження обмоток, пошкодження системи охолодження, пошкодження високовольтних вводів, пошкодження осердя та магнітного контуру, пошкодження пристрою РПН, інші пошкодження. Частка кожного з видів пошкодження показана на рис. 2.

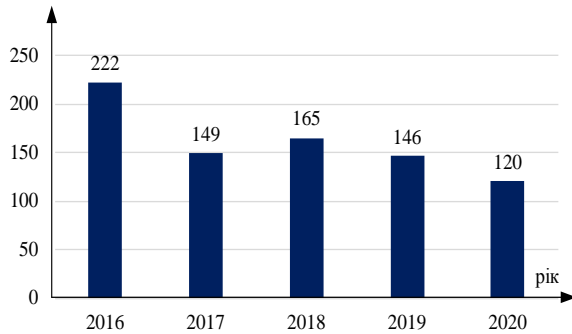


Рис. 1. Динаміка пошкоджень силових трансформаторів



Рис. 2. Причини пошкоджень силових трансформаторів

Як видно з рис. 2, лівову частку складають пошкодження обмоток. Динаміку виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток за досліджуваний період показано на рис. 3.

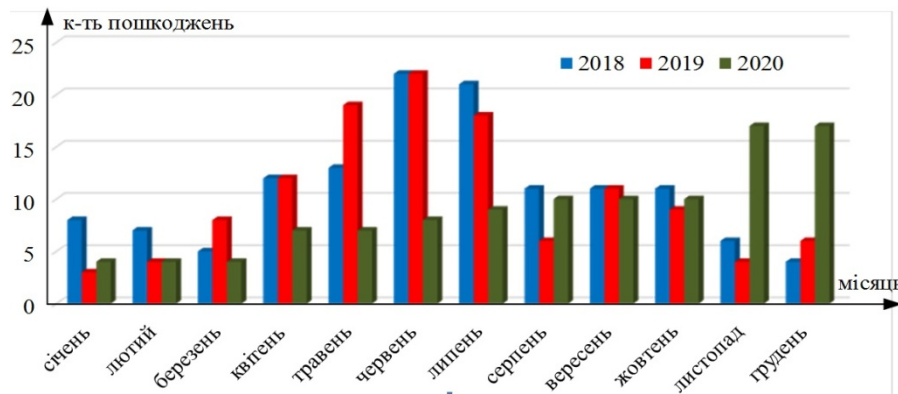


Рис. 3. Динаміка пошкоджень обмоток силових трансформаторів з 2018 по 2020 роки

Як видно з рис. 3, у 2018 та 2019 роках найбільша кількість пошкоджень припадала на квітень-липень з піком у червні, а у 2020 році максимум пошкоджень зафіксовано у листопаді та грудні.

Основними причинами пошкоджень обмоток трансформаторів були: обрив вводів, міжвиткові замикання, обриви обмоток та короткі замикання витків, нагрівання шпильки (тепловізійний дефект), пошкодження вводів, інші пошкодження.

Метою роботи є оцінка параметрів розподілу виходу з ладу силових трансформаторів шляхом статистичного аналізу та побудови математичних моделей емпіричних законів розподілу.

Результати дослідження

Для дослідження взято статистичні дані виходу з ладу силових трансформаторів 6—10 кВ через пошкодження їхніх обмоток за три роки — з 2018 по 2020.

Значення z виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток випадкової величини Z за вказаний період по місяцях має статистичний ряд:

$$z = \{8; 7; 5; 12; 13; 22; 21; 11; 11; 11; 6; 4; 3; 4; 8; 12; 19; 22; 18; 6; 11; 9; 4; 6; 4; 4; 4; 7; 7; 8; 9; 10; 10; 10; 17; 17\}. \quad (1)$$

Мінімальне значення ряду (1) $z_{\min} = 3$, а максимальне — $z_{\max} = 22$. Як бачимо, розкид достатньо великий.

Сформуємо інтервали i значень Z таким чином, щоб мінімальне значення z_{\min} попало в перший інтервал, а максимальне z_{\max} — в останній інтервал. Результатом є варіаційний ряд вибірки виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток, поданий в табл. 1.

Отримали п'ять інтервалів ($i = 5$) випадкової величини Z із сумарною кількістю $N = 36$ та кількістю значень $n_{(z)i}$, які попали в i -й напіввідкритий інтервал з відповідною частотою попадань [6]:

$$p_{(z)i} = \frac{n_{(z)i}}{n}. \quad (2)$$

Гістограма варіаційного ряду (1), побудована за даними табл. 1, показана на рис. 4.

Таблиця 1

Варіаційний ряд вибірки (1) виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток

i	Інтервали	$n_{(z)i}$	$p_{(z)i}$
1	[3—7)	11	0,31
2	[7—11)	11	0,31
3	[11—15)	7	0,19
4	[15—19)	3	0,08
5	[19—23)	4	0,11
Сума		36	1

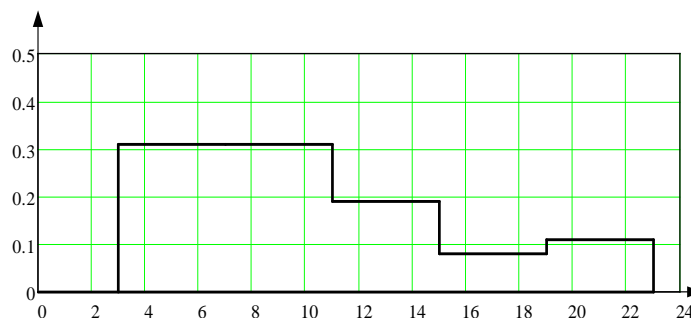


Рис. 4. Гістограма варіаційного ряду вибірки виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток

Статистичні оцінки середнього значення m_z , дисперсії D_z та середньоквадратичного відхилення σ_z випадкової величини Z з (1) знайдемо за формулами [7]:

$$\begin{cases} m_z = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j, \\ D_z = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N z_j^2 - m_z^2, \\ \sigma_z = \sqrt{D_z}. \end{cases} \quad (3)$$

За результатами розрахунків отримано

$$m_z = 10; \quad D_z = 30,06; \quad \sigma_z = 5,48. \quad (4)$$

Проаналізувавши вигляд гістограми, показаної на рис. 4, висувається гіпотеза про логарифмічний нормальний закон розподілу виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток.

Для вибірки (1) здійснимо її логарифмічне перетворення з використанням оператора $10 \lg z$

$$\hat{z} = 10 \lg z. \quad (5)$$

Після перетворення отримаємо

$$\begin{aligned} \hat{z} = \{ & 9,03; 8,45; 6,99; 10,79; 11,14; 13,42; 13,22; 10,41; 10,41; 10,41; 7,78; 6,02; \\ & 4,77; 6,02; 9,03; 10,79; 12,79; 13,42; 15,55; 7,78; 10,41; 9,54; 6,02; 7,78; \\ & 6,02; 6,02; 6,02; 8,45; 8,45; 9,03; 9,54; 10; 10; 10; 12,3; 12,3 \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Статистичні оцінки випадкової величини \hat{Z}

$$m_{\hat{z}} = 9,37; \quad D_{\hat{z}} = 5,83; \quad \sigma_{\hat{z}} = 2,42. \quad (7)$$

Гіпотезу про нормальний логарифмічний закон розподілу виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток перевіримо з використанням χ^2 -критерію Пірсона, для якого необхідним є визначення статистики Q^2 [8]

$$Q_{(\hat{z})}^2 = \sum_{i=1}^{h(\hat{z})} \frac{(n_{(\hat{z})i}^* - m_{(\hat{z})i})^2}{m_{(\hat{z})i}}, \quad (8)$$

де $h_{(\hat{z})}$ — кількість інтервалів для випадкової величини \hat{Z} з ненульовим значенням частоти попадання в ці інтервали ($h_{(\hat{z})} = 5$).

Для зручності визначення статистики $Q_{(\bar{z})}^2$ подано в табл. 2, в якій використано функцію нормального розподілу $\Phi(\hat{z}_i)$, взяту з роботи [8], і табл. 3.

Таблиця 2
Розрахунок частоти $p_{(\bar{z})i}^*$

\hat{z}_i	$\frac{\hat{z}_i - m_{\bar{z}}}{\sigma_{\bar{z}}}$	$\Phi\left(\frac{\hat{z}_i - m_{\bar{z}}}{\sigma_{\bar{z}}}\right)$	$P_{(\bar{z})i}^*$
$-\infty$	$-\infty$	0	
6,2	-1,31	0,0968	0,0968
7,9	-0,61	0,27093	0,17413
9,6	0,1	0,53893	0,2689
11,3	0,8	0,78814	0,24831
∞	∞	1	0,21186
Сума			1

Таблиця 3
Розрахунок статистики $Q_{(\bar{z})}^2$

Інтервали	$n_{(\bar{z})i}^*$	$P_{(\bar{z})i}^*$	$m_{(\bar{z})i}$	$\frac{(n_{(\bar{z})i}^* - m_{(\bar{z})i})^2}{m_{(\bar{z})i}}$
$-\infty-6,2$	7	0,0968	3,48	3,5456
6,2-7,9	4	0,17413	6,27	0,821
7,9-9,6	8	0,2689	9,68	0,292
9,6-11,3	10	0,24831	8,94	0,126
11,3- ∞	7	0,21186	7,63	0,052
Сума	36	1	36	4,836

В табл. 3 $m_{(\bar{z})i}$ — теоретична частота попадання значень \hat{Z} в кожний i -й інтервал

$$m_{(\bar{z})i} = n \cdot P_{(\bar{z})i}^* \tag{9}$$

З табл. 3 отримуємо значення статистики $Q_{(\bar{z})}^2 = 4,836$.

Незалежними параметрами нормального логарифмічного закону розподілу є середнє значення $m_{\bar{z}}$ та середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\bar{z}}$. А тому їхня кількість $r = 2$. Для статистики $Q_{(\bar{z})}^2$ кількість степенів свободи $g_{(\bar{z})}$ можна визначити як [8]

$$g_{(\bar{z})} = h_{(\bar{z})} - r - 1; \tag{10}$$

$$g_{(\bar{z})} = 5 - 2 - 1 = 2.$$

Критичну область для статистики $Q_{(\bar{z})\text{кр}}^2$ знайдемо з таблиці χ^2 -розподілу Пірсона [11], маючи кількість степенів свободи $g_{(\bar{z})} = 2$ та задавшись рівнем значимості $\alpha = 0,05$

$$Q_{(\bar{z})\text{кр}}^2 > 5,991. \tag{11}$$

Враховавши те, що розрахункове значення статистики $Q_{(\bar{z})}^2$ менше за критичне $Q_{(\bar{z})\text{кр}}^2$ ($Q_{(\bar{z})}^2 < Q_{(\bar{z})\text{кр}}^2$), то гіпотезу про нормальний логарифмічний розподіл виходу з ладу трансформаторів через пошкодження обмоток можна вважати правильною.

Для моделі нормального закону розподілу густина імовірності випадкової величини \hat{Z} мала б вигляд

$$f(\hat{z}) = \frac{1}{\sigma_{\bar{z}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\hat{z}-m_{\bar{z}}}{\sigma_{\bar{z}}}\right)^2}. \tag{12}$$

А математична модель нормального логарифмічного закону для \hat{Z} буде справедлива в формі (12), (5) зі статистичними оцінками (7).

Визначимо довірчі інтервали для параметрів (7) з довірчою імовірністю $\gamma = 0,98$. З таблиці розподілу Стюдента [12] знайдемо величину $t_{\gamma} = 2,436$.

За таблицею χ^2 -розподілу знайдемо дві пари чисел u_1 і u_2 , які задовольняли б умові

$$P(u_1 \leq \chi^2 \leq u_2) = \gamma \tag{13}$$

з симетричністю за імовірністю

$$P(\chi^2 < u_1) = P(\chi^2 > u_2) = \frac{1}{2}(1-\gamma); \quad P(\chi^2 > u_1) = \frac{1}{2}(1+\gamma). \tag{14}$$

Використовуючи таблицю χ^2 -розподілу з роботи [11], [12], отримаємо $u_1 = 18,509$; $u_2 = 57,342$. Точність оцінки розраховуємо за формулою [11]

$$\Delta_{(\bar{z})} = t_\gamma \frac{\sigma_{\bar{z}}}{\sqrt{n}}, \quad (15)$$

$$\Delta_{(\bar{z})} = 2,436 \frac{2,415}{\sqrt{36}} = 0,98.$$

Знаходимо довірчі інтервали для середнього значення $m_{\bar{z}}$, дисперсії $D_{\bar{z}}$ та стандартного відхилення $\sigma_{\bar{z}}$ за відповідними формулами [11]

$$\left[m_{\bar{z}} - t_\gamma \frac{\sigma_{\bar{z}}}{\sqrt{n}} \right] \leq m_{\bar{z}} \leq \left[m_{\bar{z}} + t_\gamma \frac{\sigma_{\bar{z}}}{\sqrt{n}} \right],$$

$$\frac{(n-1)D_{\bar{z}}}{u_2} \leq D_{\bar{z}} \leq \frac{(n-1)D_{\bar{z}}}{u_1}, \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_{\bar{z}}\sqrt{n-1}}{\sqrt{u_2}} \leq \sigma_{\bar{z}} \leq \frac{\sigma_{\bar{z}}\sqrt{n-1}}{\sqrt{u_1}}.$$

В результаті розрахунків отримаємо такі довірчі інтервали:

$$8,385 \leq m_{\bar{z}} \leq 10,346; \quad 3,559 \leq D_{\bar{z}} \leq 11,027; \quad 1,887 \leq \sigma_{\bar{z}} \leq 3,321. \quad (19)$$

Висновки

Досліджуючи статистичні дані встановлено, що основна причина виходу з ладу силових трансформаторів зумовлена пошкодженням обмоток, що становить 82,17% від усіх причин. Встановлено, що у 2018 та 2019 роках найбільша кількість пошкоджень обмоток силових трансформаторів припадала на квітень—липень з піком у червні, а у 2020 році максимум пошкоджень зафіксовано в листопаді та грудні.

В результаті досліджень встановлено, що закон розподілу виходу з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток є нормально логарифмічним. З довірчою імовірністю $\gamma = 0,98$ визначено довірчі інтервали для статистичних оцінок середнього значення, дисперсії та середньоквадратичного відхилення, які характеризують вихід з ладу силових трансформаторів через пошкодження обмоток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. П. Розводюк, В. Є. Вдовиченко, і К. М. Розводюк, «Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 3/2019 (47), с. 35-47, 2019. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.35-47>.
- [2] О. В. Паланюк, «Пристрій для оцінювання витрачання робочого ресурсу обмоток силового масляного трансформатора,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 42-47, 2022.
- [3] И. Г. Гун, В. М. Салганик, С. А. Евдокимов, и А. А. Сарлыбаев, «Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условия эксплуатации,» *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. Магнитогорск, № 1, с. 102-105, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-neispravnosti-i-metody-diagnostirovaniya-silovyh-transformatorov-v-usloviyah-ekspluatatsii.pdf>.
- [4] О. М. Полях, «Аналіз систем діагностування тягових трансформаторів,» *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, № 6 (112), с. 39-45, 2013.
- [5] О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, і М. О. Гришук, «Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів,» *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харків, № 23(1245), с. 41-46, 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/31931/1/vestnik_KhPI_2017_23_Rubanenko_Vyznachennia.pdf.
- [6] П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, і І. А. Жук, «Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 43-51, 2005.
- [7] М. П. Розводюк, В. В. Овчарук, В. Є. Вдовиченко, і І. М. Овчар, «Визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора на базі нечіткої логіки,» *Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 — 30.04.2019. Zbiór artykułów naukowych enzowanych. Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej (on-line) zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.04.2019)*. Warszawa, 2019. 84 str, s. 71-77.
- [8] V. Grabko, S. Tkachenko, and O. Palaniuk, «Determination of temperature distribution on windings of oil transformer

based on the laws of heat transfer,» *ScienceRise*, no. 5, pp. 3-13, 2021.

[9] В. Б. Дудко, Б. І. Мокін, і М. П. Розводюк, «Математичні моделі емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 42-46, 2002.

[10] Г. Г. Швачич, А. В. Соболенко, и А. И. Оржех, *Теория вероятностей и математическая статистика. Часть 2. Математическая статистика*, учеб. пос. Днепропетровск, Украина: НМетАУ, 2006, 56 с.

[11] Я. К. Колде, *Практикум по теории вероятностей и математической статистике*. М.: Высшая школа, 1991, 157 с.

[12] М. Горонескуль, *Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології*. Харків, Україна: УЦЗУ, 2009, 90 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023

Розводюк Михайло Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Вдовиченко Віталій Євгенович — аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: vitosvdovychenko0704@gmail.com ;

Розводюк Катерина Михайлівна — студентка факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, e-mail: rozvodiukkm@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. P. Rozvodiuk¹
V. Ye. Vdovychenko¹
K. M. Rozvodiuk¹

Mathematical Model of Empirical Distribution Law of Power Transformer Failure Due to Winding Damage

¹Vinnitsia National Technical University

The work is devoted to the identification of the law of distribution according to statistical data of failure of power transformers of 6–10 kV due to damage to their windings for a three-year period: from 2018 to 2020.

According to statistical data, it has been established that there is a tendency to reduce damage to power transformers by almost two times. But the number of these failures still remains quite large. The main cause of power transformers failure is damage to their windings, which accounts for 82.17% of other causes. Therefore, the statistics that characterize the failure of power transformers due to damage to the windings were taken for research.

It was established that in 2018 and 2019, the largest number of damages to power transformer windings occurred in April–July with a peak in June, and in 2020, the maximum damages were recorded in November and December.

The prerequisite for building mathematical models for predicting the failure of power transformers due to the damage to the windings in order to ensure the necessary number of spare parts for their quick recovery is the study of the nature of the failure of transformers. The following methods were used to solve the tasks: passive experiment — to collect information about the failure of power transformers; statistical analysis — to build an empirical law of distribution.

After analyzing the view of the histogram of the variation series of the sample of failure of power transformers due to damage to the windings, a hypothesis was put forward about the logarithmic normal distribution law of the failure of transformers due to damage to the windings. Pearson's χ^2 -test was used to check it. As a result of the study, the proposed hypothesis was confirmed. Using Student's tables and the χ^2 -distribution table with a confidence probability of $\gamma^2 = 0.98$, confidence intervals were determined for statistical estimates of the mean value, variance and root mean square deviation, which characterize the failure of power transformers due to damage to the windings.

With further research, it will be possible to build mathematical models for predicting the failure of power transformers due to damage to the windings.

Keywords: power transformer, winding damage, statistical analysis, distribution law.

Rozvodiuk Mykhailo P. — Cand. Sc (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Vdovychenko Vitalii Ye. — Post-Graduate Student of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, e-mail: vitosvdovychenko0704@gmail.com ;

Rozvodiuk Kateryna M. — Student of the Department of Intellectual Information Technologies and Automation, e-mail: rozvodiukkm@gmail.com