

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАСЛОНАПОВНЕНИХ ВВОДІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПЕРІОДИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Шутенко О. В., Загайнова О. А., Сердюкова Г. М.

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

*Наведено результати аналізу залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації в високовольтних вводах з частковими розрядами. Встановлено, що розвиток часткових розрядів у вводах не призводить до зміни показників ізоляції, які вимірюються на низькій напрузі.*

**Постановка проблеми.** Як показує досвід експлуатації, високовольтні вводи є одним з вузлів, який частіше пошкоджується як в силових трансформаторах, шунтуючих реакторах, так і вимикачах. При цьому пошкодження вводів часто супроводжуються вибухами і пожежами, що призводить до значного економічного збитку [1-5]. У зв'язку з цим удосконалення методів діагностики стану ізоляції високовольтних вводів є актуальною і практично важливим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час при періодичних випробуваннях стану ізоляції вводів, значення показників вимірюються на напрузі, яка набагато нижча за робочу напругу. Отримані значення порівнюються з гранично-допустимими показниками, які регламентовані в діючих стандартах, наприклад в [6-8], або з результатами попередніх випробувань. Однак, періодичні випробування не завжди дозволяють своєчасно виявити пошкодження ізоляції. У зв'язку з цим, питанням удосконалення методів контролю стану ізоляції, присвячена досить велика кількість публікацій. Отже в роботі [9] наводяться результати аналізу впливу вологи і продуктів старіння ізоляції на значення тангенса кута діелектричних втрат і ємності основної ізоляції вводів. В роботі [10] аналізується виникнення часткових розрядів в ізоляції вводів, зокрема наведено розподіл електричного поля по обкладкам вводів. В [11] встановлено, що для раннього виявлення зволоження необхідно виконувати вимірювання показників на частоті 1 МГц і 10 кГц. Відзначено переваги використання високочастотних методів вимірювання показників у порівнянні з вимірами на частоті 50 Гц.

Узагальнюючи наведені результати, можна констатувати, що в основному вдосконалення методів контролю стану ізоляції високовольтних вводів спрямовані на удосконалення методів вимірювання значень показників. В той же час питання удосконалення методів прийняття рішень при проведенні періодичного контролю практично не розглядаються. Остання обставина і послужила причиною для проведення даного дослідження.

**Мета статті.** Метою виконаних досліджень є оцінка можливостей розпізнавання часткових розрядів в ізоляції високовольтних маслonaповнених вводів за результатами періодичних випробувань.

**Метод дослідження.** В якості вихідних даних аналізувалися результати періодичних випробувань по 18 високовольтних вводів напругою 110 кВ негер-

метичної конструкції, в яких за результатами аналізу розчинених у маслі газів були виявлені часткові розряди. На першому етапі досліджень було виконано порівняння показників ізоляції високовольтних вводів, отриманих на момент виявлення часткових розрядів, з гранично – допустимими значеннями, регламентованими в [6]. За результатами порівняння встановлено, що значення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції ( $\text{tg}\delta_1$ ) і значення тангенса кута діелектричних втрат ізоляції вимірювального виведення ( $\text{tg}\delta_2$ ) не перевищують гранично допустимих значень. Також не виявлено суттєвих змін в значеннях ємності основної ізоляції ( $C_1$ ) і ємності ізоляції вимірювального виведення ( $C_2$ ), а також значення опору ізоляції вимірювального виведення ( $R$ ). Така обставина дозволила зробити попередній висновок про те, що вимірювання, що виконуються на низькій напрузі, не дозволяють виявляти часткові розряди в ізоляції високовольтних маслonaповнених вводів.

Однак, можна припустити, що при виникненні часткових розрядів значення показників змінюються, але незначно, і тому не перевищують гранично-допустимих значень. Для перевірки цієї гіпотези запропоновано проаналізувати характер зміни показників ізоляції високовольтних вводів в часі, порівнюючи характер залежностей показників у вводах з частковими розрядами з характером залежностей показників в справних вводах, встановлених на сусідніх фазах. Передбачалося, якщо часткові розряди впливають на показники ізоляції, то характер залежностей показників в справних і несправних вводах буде істотно відрізнятися [12]. Для оцінки характеру залежностей показників зручно використовувати значення коефіцієнта парної кореляції [13]:

$$r_B = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (1)$$

де  $r_B$  – вибіркове значення коефіцієнта парної кореляції;

$p_i$  – поточне значення показника якості;

$t_i$  – поточне значення часу експлуатації;

$\bar{p}$  – середнє значення показника якості;

$\bar{t}$  – середнє значення часу експлуатації;

$n$  – обсяг вибіркових значень.

Рішення про наявність значущого кореляційного зв'язку приймалося, якщо розрахункове вибіркове значення коефіцієнта парної кореляції ( $r_b$ ) перевищувало критичне значення ( $r_{\text{крит.}}$ ), при числі ступенів свободи  $n-2$  і довірчої ймовірності  $p = 0,95$ . Такий підхід дозволяє не тільки оцінити наявність зв'язку між показниками і тривалістю експлуатації, але і оцінити зв'язок між окремими показниками, а також між показниками у вводах на сусідніх фазах.

**Аналіз результатів.** Як приклад, проаналізуємо динаміку зміни в часі показників ізоляції в трансформаторному вводі негерметичної конструкції напругою 110 кВ, встановленому на фазі В силового трансформатора ТРДН 25/110. За результатами аналізу розчинених у маслі газів від 27.07. 2018 року у даному вводі були виявлені часткові розряди з високою щільністю енергії. Динаміка зміни концентрацій розчинених в маслі газів в даному вводі відображена на рис. 1 (вертикальної пунктирною лінією на рис.1 виділена дата виявлення дефекту). Як видно з рис.1, при розвитку дефекту (в даному випадку часткових розрядів) в залежності концентрацій газів від тривалості експлуатації спостерігається поява значущої систематичної складової, що добре узгоджується з результатами наведеними в [14-15]. Результати аналізу кореляційних зв'язків між значеннями концентрацій газів і тривалістю експлуатації, а також між концентраціями окремих газів, розчинених в маслі високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати аналізу кореляційних зв'язків між значеннями концентрацій газів і тривалістю експлуатації, а також між концентраціями окремих газів, розчинених в маслі високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди.

Газ	Тривалість експлуатації	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
$n=8, r_{\text{крит.}, 6, 0,95}=0,707$						
H <sub>2</sub>	<b>0.764</b>		0.999	0.999	-0.372	0.999
CH <sub>4</sub>	<b>0.738</b>	0.999		1.000	-0.407	1.000
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<b>0.746</b>	0.999	1.000		-0.400	1.000
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.242	-0.372	-0.407	-0.400		-0.406
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<b>0.739</b>	0.999	1.000	1.000	-0.406	

Таблиця 2 – Результати аналізу кореляційних зв'язків між значеннями показників ізоляції і тривалістю експлуатації і між окремими показниками високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди

Показник	Тривалість експлуатації	tgδ <sub>1</sub>	tgδ <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	R
$n=8, r_{\text{крит.}, 6, 0,95}=0,707$						
tgδ <sub>1</sub>	<b>0.765</b>	<b>1,00</b>	<b>0.938</b>	0.576	0.279	-0.575
tgδ <sub>2</sub>	0.628	<b>0.938</b>	<b>1,00</b>	0.298	-0.048	-0.301
C <sub>1</sub>	0.666	0.576	0.298	<b>1,00</b>	<b>0.934</b>	-0.621
C <sub>2</sub>	0.493	0.279	-0.048	<b>0.934</b>	<b>1,00</b>	-0.615
R	-0.506	-0.575	-0.301	-0.621	-0.615	<b>1,00</b>

Як видно з табл.1, для всіх газів, крім етилену (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), значення коефіцієнтів парної кореляції перевищують критичне значення, що свідчить про значне зростанні концентрацій даних газів в часі, тобто наявності значущої систематичної складової в тимчасових залежностях даних концентрацій. Крім того, наявність значущої кореляції між усіма газами, окрім C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, свідчить про те, що зростання концентрацій газів, яка викликана однією причиною і відбувається одночасно, що згідно [15], свідчить про наявність дефекту, навіть без урахування значень концентрацій газів.

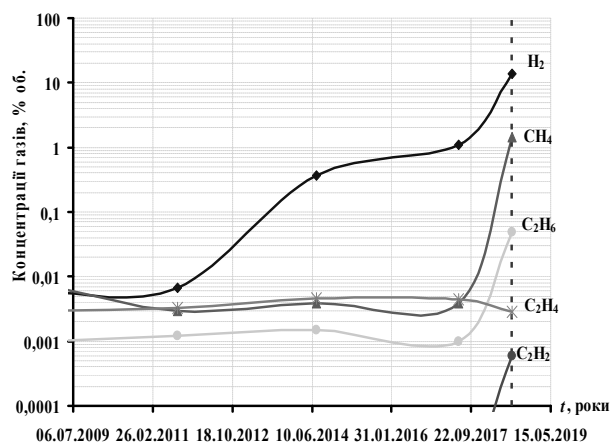


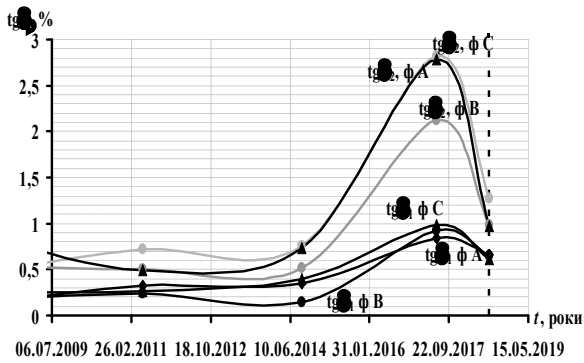
Рисунок 1 – Залежності концентрацій газів, розчинених в маслі високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди від тривалості експлуатації

Результати кореляційного аналізу для показників ізоляції високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди, наведені в табл. 2.

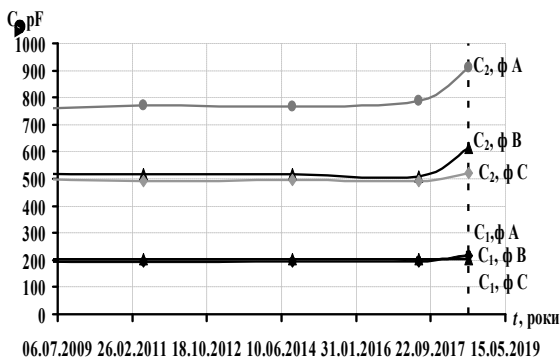
Як видно з табл. 2, наявність значущої систематичної складової в залежності показників від тривалості експлуатації виявлені тільки для тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції вводу (tgδ<sub>1</sub>). Значущий кореляційний зв'язок має місце лише між тангенсом кута діелектричних втрат основної ізоляції (tgδ<sub>1</sub>) і тангенсом кута діелектричних втрат зовнішніх шарів ізоляції (tgδ<sub>2</sub>) і між ємністю основної ізоляції (C<sub>1</sub>) і ємністю зовнішніх шарів ізоляції (C<sub>2</sub>).

Таблиця 3 – Результати аналізу кореляційних зв'язків між значеннями показників ізоляції високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди, і показниками ізоляції справних вводів з сусідніх фаз

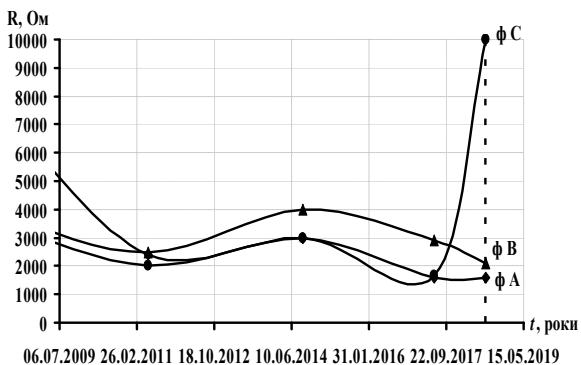
Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=8, r_{\text{крит. 6, 0,95}}=0,707$					
A-B	<b>0.959</b>	<b>0.991</b>	<b>0.974</b>	<b>0.950</b>	0.647
A-C	<b>0.955</b>	<b>0.961</b>	0.373	<b>0.852</b>	-0.184
B-C	<b>0.949</b>	<b>0.980</b>	0.548	<b>0.951</b>	-0.497



а



б



в

Рисунок 2 – Залежності показників ізоляції від тривалості експлуатації для високовольтного вводу 110 кВ негерметичної конструкції, в якому виявлені часткові розряди (фаза В), і справних високовольтних вводів, які встановлені на сусідніх фазах трансформатора:

- а) залежності  $\text{tg}\delta_1$  і  $\text{tg}\delta_2$ ; б) залежності  $C_1$  і  $C_2$ ;  
в) залежності R

Для перевірки причин зростання значень  $\text{tg}\delta_1$  у вводі фази В, був виконаний кореляційний аналіз між значеннями показників ізоляції вводів на сусідніх фазах трансформатора. Передбачалося, якщо причиною зростання  $\text{tg}\delta_1$  у вводі фази В були часткові розряди, то характер зміни даного показника в часі повинен істотно відрізнитися від характеру зміни в часі значень  $\text{tg}\delta_1$  в справних вводах. Тобто значущий кореляційний зв'язок між показниками дефектного і справних вводів повинен бути відсутній. Результати аналізу наведені в табл. 3, а залежності показників ізоляції від тривалості експлуатації для дефектного вводу (фаза В) і справних вводів (фази А і С) наведені на рис. 2 (вертикальної пунктирною лінією на рис.2 виділена дата виявлення дефекту).

Як видно з рис.2, характер залежностей  $\text{tg}\delta_1$  і  $\text{tg}\delta_2$  для вводу з частковими розрядами повністю збігається з характером залежностей даних показників для справних вводів, про що свідчить наявність значущості кореляційної зв'язку між значеннями цих показників у всіх трьох фазах (див. табл. 3).

Більш того, значення  $\text{tg}\delta_1$  і значення  $\text{tg}\delta_2$  у вводі фази В в момент виявлення дефекту, за результатами аналізу розчинених газів, менше ніж значення даних показників, отриманих в попередньому вимірі. При цьому значення  $\text{tg}\delta_1$  і  $\text{tg}\delta_2$  не перевищують гранично-допустимих значень, які регламентовані в [6]. Також виявлено значущий кореляційний зв'язок між значеннями ємності основної ізоляції для вводів, які встановлені на фазах В і А.

В той же час, не дивлячись на те, що залежності ємності основної ізоляції всіх трьох вводів практично збігаються (див. рис. 1 б), значущий зв'язок між значеннями  $C_1$  в фазах А і С і фазах В і С відсутній. Характер динаміки зміни в часі для ємності  $C_2$ , аналогічний для вводів на всіх трьох фазах. Залежності опорів вимірювального виведення для вводів, встановлених на фазах А і В, мають схожий характер і незначно знижуються з плином часу, а ось значення опору фази С істотно зростає. Слід зазначити, що аналогічні результати отримані і для інших 17 вводів, в яких виявлені часткові розряди. Наведені результати показують, що розвиток в ізоляції високовольтних вводів таких дефектів, як часткові розряди, не приводить не тільки до значного зростання (або зниження) значень показників ізоляції, але і не призводять до характерної зміни динаміки даних показників у часі.

Таким чином, показано, що своєчасне виявлення часткових розрядів за результатами профілактичних випробувань показників ізоляції високовольтних вводів принципово неможливо. Для розпізнавання такого роду дефектів доцільно використовувати результати

аналізу розчинених у маслі газів. Однак, якщо для вводів негерметичної конструкції проведення таких аналізів не викликає складнощів, то для вводів герметичної конструкції відбір проб масла вимагає доливання масла у ввід, що може привести до їх пошкодження в разі недотримання технологічного процесу доливання.

**Висновки.** Виконаний аналіз показав, що періодичні випробування, які роблять на низькій напрузі, дозволяють виявити далеко не всі дефекти високовольтних вводів.

Так розвиток в ізоляції високовольтних вводів таких дефектів, як часткові розряди, не приводить не тільки до значного зростання (або зниження) значень показників ізоляції, але і не призводить до характерних змін динаміки даних показників у часі. У зв'язку з цим для виявлення дефектів, які швидко розвиваються, в тому числі і часткових розрядів, доцільніше використовувати методи безперервного контролю на робочій напрузі.

### Список використаних джерел

1. Feilat E. A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. *Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng.* 2013. Vol. 7. P. 791–796.
2. Anghuber Martin, Velásquez Juan L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. *Transformer Magazine*. Special Edition: Bushing. 2017. P. 126–132.
3. Septyani H. I., Arifianto I., Purnomoadi A. P High voltage transformer bushing problems. *Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, 2011. International Conference on. IEEE. 2011. P. 1–4.
4. Metwally I. A., Metwally I. A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. *IEEE Potentials*. 2011. Vol. 30, Issue 03. P. 36 – 43.
5. Рубаненко О. Є., Гуменюк О. І Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 183 с.
6. Норми випробування електрообладнання : СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. Київ : ОЕП "ГРИФРЕ" : М-во палива та енергетики України, 2007. 262 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
7. IEC – 60137, Edition 7.0 2017 — 06, International Electro-technical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.
8. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
9. Amit Mehta, R. N. Sharma, Sushil Chauhan and S. D. Agnihotri Study the Insulation System of Power Transformer Bushing. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 4, August 2011. P. 544–547.
10. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear. *Electricity Distribution (CICED)*, 2014 China International Conference on. IEEE, 2014. P. 1225-1229.
11. Bo Qi, Quanmin Dai , Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu and Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture

Ingress into Oil-Impregnated Paper Bushing. *Energies*. – 2018. Т. 11. №. 6. P. 1496., doi:10.3390/en11061496.

12. Шутенко О. В., Загайнова А. А. Диагностика состояния высоковольтных маслонаполненных вводов на основе анализа динамики изменения показателей изоляции во времени. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*: збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Харків : НТУ "ХПІ". – 2019. № 18 (1343). С. 62–76.

13. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособ. для вузов. Москва : Высш. шк., 1977. 479 с.

14. Шутенко О. В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. *Электрические сети и системы* 2010. №. 3. С. 38-45.

15. Shutenko Oleg. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2018. Vol. 18. №. 1. P. 11–18; DOI: 10.15546/aei-2018-0002.

### Аннотация

#### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ВВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Шутенко О. В., Загайнова А. А.,  
Сердюкова Г. Н.

Приведены результаты анализа зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации в высоковольтных вводах с частичными разрядами. Установлено, что развитие частичных разрядов во вводах не приводит к изменению показателей изоляции, измеряемых на низком напряжении.

### Abstract

#### ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF RECOGNITION OF PARTIAL DISCHARGES IN ISOLATION OF HIGH-VOLTAGE OIL-FILLED BUSHINGS BY THE RESULTS OF PERIODIC TESTS

O. Shutenko, A. Zagaynova,  
G. Serdyukova

The results of the analysis of the dependences of the insulation indicators on the duration of operation in high-voltage bushings with partial discharges are presented. It is established that the development of partial discharges in the high-voltage bushings does not lead to a change in the insulation indicators, measured at low voltage.