

УДК 621.315.615.2

О.Р. Проценко, Є.О. Троценко

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОГО ПАПЕРУ ЯК ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

This paper determines possibilities of using insulating paper as a humidity sensor element for monitoring the humidity level of transformer oil in power transformers. We propose to construct the sensor unit of the humidity sensor as a cylindrical capacitor structure, in which the dielectric is the electrically insulating paper soaked in transformer oil. Moreover, we conduct the investigation of relation between conductivity of insulating paper, transformer oil and moisture; temperature and electric field occurring at measuring their resistance at a constant voltage. Furthermore, we determine the electric field value, at which the resistance of insulating paper soaked in transformer oil can be considered dependent only on the temperature and humidity. We also define the formula describing this dependence. The research results show the possibility of creating the humidity sensor based on the transformation of "moisture-resistance" providing continuous monitoring of moisture in transformer oil during its operation.

Вступ

Протягом останніх десятиліть безперебійна та надійна робота електроенергетичних систем в Україні та за кордоном забезпечувалась системою планово-попереджувальних ремонтів високовольтного обладнання підстанцій та ліній електропередач. Однак на сьогодні як у нас в країні, так і в усьому світі, спостерігається поступове старіння парку обладнання [1]. В таких умовах основним завданням виробників та експлуатаційних організацій є зниження витрат, пов'язаних з експлуатацією обладнання при збереженні високої енергоефективності, безаварійної та надійної роботи. Актуальним також є оцінювання можливості продовження строків експлуатації обладнання понад нормовані, прогнозування строків планово-попереджувальних ремонтів, формування можливостей для переходу до експлуатації необслуговуваних підстанцій. Таким чином, визначені найбільш пріоритетні завдання [2]:

- розроблення ефективної автоматизованої системи збору діагностичних даних від найбільш відповідальних елементів енергосистеми, яка дасть можливість фіксувати дефекти, що розвиваються, та запобігати їх подальшому розвитку;
- перехід від затратної системи періодичного обслуговування до системи обслуговування відповідно до поточного технічного стану енергообладнання;
- створення автоматизованої системи прогнозування відмов устаткування та обладнання на базі діагностичної інформації, отримуваної під час його роботи.

Поставлені завдання можуть бути вирішені через використання системи безперервного контролю (моніторингу) технічного стану облад-

нання підстанції, зокрема, ізоляції трансформаторів і реакторів. Робота таких систем базується на аналізі інформації, яка надходить з різноманітних датчиків, як штатно встановлених, так і спеціально розроблених.

Серед важливих параметрів, які визначають технічний стан обладнання та надійність його роботи, є вологість трансформаторного масла [2]. Актуальність контролю зволоження трансформаторного масла пояснюється тим фактом, що навіть незначна кількість домішок води (соті частки відсотка) у вигляді емульсії призводить до зменшення електричної міцності масла. Опосередковано волога впливає також на зниження електричної міцності твердої ізоляції. Так, пробивна напруга кабельного паперу після витримки протягом 60 днів у вологому маслі зменшується на 25 % [3].

Існуючі норми передбачають наявність розчиненої в маслі вологи в процесі експлуатації електрообладнання на рівні 20 г/т. Контроль цього параметра покладається на періодичні аналізи, які проводяться у стаціонарних умовах хімічних лабораторій на відібраних пробах масла. Аналіз сучасних методів акваметрії [4] визначає доволі широкий спектр приладів для вирішення завдань вимірювання кількості вологи в трансформаторних маслах. В енергетиці найбільшого поширення набули методи кількісного визначення розчиненої в маслі води – гідрид кальцієвий за ГОСТ 7822 [5] та кулонометричний за ГОСТ 24614 [6]. Однак як перший, так і другий методи, є лабораторними, а принципи, на яких вони базуються, не можуть бути покладені в основу автоматизованих систем, оскільки потребують доволі складної реалізації та значних матеріальних затрат.

Найбільш ефективні системи безперервного відстежування (моніторингу) вологості трансформаторного масла базуються на застосуванні простих, з технологічної точки зору, та надійних датчиків.

На сьогодні є певна кількість різноманітних чутливих елементів, які використовуються у датчиках для вимірювання вологості нафтопродуктів, зокрема, трансформаторного ізоляційного масла. Доволі поширеними є кондуктометричні перетворювачі вологості, в яких відбувається зміна питомої провідності (питомого опору) чутливого елемента при постійному струмі від зміни вологості масла [7] та дієлькометричні вологоміри нафтопродуктів [8–10]. Дія останніх ґрунтується на залежності діелектричної проникності чутливого елемента від вологості масла. Однак застосування вказаних конструкцій на практиці має базуватись на дослідженнях, які встановлять зв'язок вологості масла з певними характеристиками чутливого елемента, які в згаданих джерелах не наводяться.

В основі запропонованого в цій роботі датчика лежить кондуктометричний перетворювач з чутливим елементом на основі целюлозних матеріалів, зокрема, кабельного ізоляційного паперу. Оскільки з плином часу, який залежить від температури, виникає стан динамічної рівноваги між вологою, яка знаходиться у надмасляному просторі, вологою, розчиненою в маслі, та вологою, яка міститься у твердій ізоляції (картон, папір) [11]. Аналогічні процеси будуть відбуватися і в чутливому елементі датчика вологості, в основі якого лежить кабельний папір, розміщений в тому ж самому маслі високоевольтного апарата. Таким чином, вимірюючи характеристики цього елемента, наприклад, об'ємний опір, та встановивши його зв'язок зі зволоженням масла та температурою, отримаємо можливість визначати зволоження масла в безперервному режимі.

Постановка задачі

Мета статті – з'ясувати можливості використання просоченого маслом паперу як чутливого елемента датчика зволоження трансформаторного масла, що передбачає виявлення зв'язків його характеристик, перш за все, електричного опору, від таких факторів, як температура, вологість масла та напруженість електричного поля.

Залежність електропровідності електроізоляційного паперу від вологості трансформаторного масла

Якщо припустити, що конструкція датчика являє собою елемент конденсатора з папером між його обкладинками, то ізоляція такого конденсатора буде складатися з двох діелектричних матеріалів – електроізоляційного паперу та трансформаторного масла, в якому він розміщений. Характеристики цих матеріалів залежать від їх вологості, температури, а також напруженості електричного поля, яка виникає під час вимірювання їх опору при постійній напрузі.

Експериментально встановлено, що для маслбар'єрної ізоляції, наприклад, питома електропровідність електротехнічного картону і трансформаторного масла приблизно описується формулами [12]

$$\sigma_k = \rho_{k0}^{-1} \exp(\alpha_k \theta_k + \delta_k W_k + \beta_k E_k), \quad (1)$$

$$\sigma_m = \rho_{m0}^{-1} \exp(\alpha_m \theta_m + \delta_m W_m + b E_m^2 - a E_m), \quad (2)$$

де $\rho_{k0} = 10^{12} - 10^{16}$ Ом·см [13]; $\rho_{m0} = 10^{14} - 10^{15}$ Ом·см [14]; θ_k і θ_m – температури картону і масла в градусах Цельсія; E_k і E_m – напруженості електричного поля в картоні та маслі відповідно, В/см; W_k – відносний вологовміст картону, %; W_m – абсолютний вологовміст масла, г/т; $\alpha_k = 0,1$ (1/°C); $\delta_k = 2,0$ (1/%); $\beta_k = 3,5 \cdot 10^{-6}$ см/В; $\alpha_m = 0,06$ (1/°C); $\delta_m = 0,3$ (т/г); $b = 10^{-9}$ (см²/В²); $a = 5 \cdot 10^{-5}$ (см/В).

Оскільки електрокартон і папір це однотипні за своєю природою матеріали, то зміна їх характеристик при зволоженні буде мати однаковий характер. Тому в першому наближенні будемо вважати, що характеристики паперу мало відрізняються від характеристик картону.

Абсолютний вологовміст W_m і відносна вологість φ_m трансформаторного масла пов'язані таким співвідношенням:

$$\varphi_m = \frac{W_m}{W_{\text{нас}}} 100 \%, \quad (3)$$

де $W_{\text{нас}}$ – граничний вологовміст масла (г/т) при його насиченні, розраховується за формулою

$$W_{\text{нас}} = W_{40} \exp\left(\frac{B}{313} - \frac{B}{T}\right), \quad (4)$$

де W_{40} – гранична вологомисткість за температури масла 40 °С; $T = 273 + \theta$ – абсолютна температура.

Експериментально встановлено [15], що $B = 3598$, причому W_{40} має різні значення для різних типів масла (табл. 1).

Таблиця 1. Граничний вологовміст для різних типів трансформаторного масла

Тип масла	ТКП	Т–750	Т–1500	ГК
W_{40} , г/т	260	284	185	148

Для діапазону відносної вологості $10 \leq \varphi_M \leq 70$ % вологовміст картону розраховується за емпіричною формулою [16]:

$$W_K = \frac{\ln \varphi_M}{0,94 - 0,0076\varphi_M}, \% \quad (5)$$

а при вологості $1 < \varphi_M < 10$ % можна застосувати таке співвідношення:

$$W_K = K_1 + K_2 \varphi_M, \quad (6)$$

де K_1 і K_2 – постійні коефіцієнти.

Для зручності аналізу формули (1) і (2) запишемо у вигляді

$$\sigma_K = \sigma_{K0} \exp(\beta_K E_K), \quad (7)$$

$$\sigma_M = \sigma_{M0} \exp(bE_M^2 - aE_M), \quad (8)$$

$$\sigma_{K0} = \rho_{K0}^{-1} \exp(\alpha_K \theta_K + \delta_K W_K), \quad (9)$$

$$\sigma_{M0} = \rho_{M0}^{-1} \exp(\alpha_M \theta_M + \delta_M W_M). \quad (10)$$

Надалі при розрахунках прийнято, що $\rho_{K0} = 10^{16}$ Ом·см, а $\rho_{M0} = 10^{14}$ Ом·см.

Важливим фактором, який впливає на характеристики чутливого елемента, є напруженість електричного поля, яка виникає при вимірюванні його опору. Оскільки напруженість електричного поля в картоні та маслі для реальних конструкцій практично ніколи не перевищує 100 000 В/см [17], то візьмемо для оцінки її впливу на характеристики чутливого елемента такі ж значення, а саме: $E_K = E_M = 100\,000$ В/см, а з виразів (7) і (8) отримуємо

$$\sigma_K = \sigma_{K0} \exp(0,35) = 1,42 \sigma_{K0}, \quad (11)$$

$$\sigma_M = \sigma_{M0} \exp(5) = 148,41 \sigma_{M0}. \quad (12)$$

З результатів розрахунків по (11) і (12) видно, що вплив напруженості електричного поля на провідність середовища, особливо для транс-

форматорного масла, може бути істотним. Для визначення оптимальної робочої напруженості електричного поля, при якій необхідно проводити вимірювання опору чутливого елемента, бажано, щоб $\sigma_K \approx \sigma_{K0}$ і $\sigma_M \approx \sigma_{M0}$. Результати розрахунків за формулами (7)–(10) при варіюванні напруженості електричного поля від 3000 до 80 000 В/см наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Вплив напруженості електричного поля E на електропровідність електротехнічного картону σ_K і трансформаторного масла σ_M згідно з формулами (7)–(10)

E , В/см	σ_K / σ_{K0}	σ_M / σ_{M0}
3000	1,01	0,87
4000	1,01	0,83
5000	1,02	0,80
8000	1,03	0,71
10000	1,04	0,67
20000	1,07	0,55
30000	1,11	0,55
40000	1,15	0,67
50000	1,19	1,00
60000	1,23	1,82
70000	1,28	4,06
80000	1,32	11,02

Як видно з даних цієї таблиці, формули (7)–(10) необхідно розглядати як наближені, оскільки при напруженості електричного поля, меншій ніж 50 000 В/см, розрахунок дає співвідношення $\frac{\sigma_M}{\sigma_{M0}} < 1$, а не $\frac{\sigma_M}{\sigma_{M0}} \rightarrow 1$, як має бути з огляду на фізичні міркування. Тим не менше, для наближених розрахунків, згідно з табл. 2, при напруженості електричного поля, меншій ніж 50 000 В/см, можна припустити, що $\sigma_K \approx \sigma_{K0}$ і $\sigma_M \approx \sigma_{M0}$, а як робочу напруженість електричного поля при вимірюваннях опору вологочутливого елемента рекомендувати дотримуватись її значення в межах 3000–10 000 В/см.

Аналіз проведених розрахунків

Практично важливим є співвідношення електропровідностей трансформаторного масла і паперу (електротехнічного картону). Залежність цього співвідношення від температури і вологовмісту масла, розрахована за формулами (3)–(10), наведено у табл. 3 для електротехнічного картону.

Як впливає з наведених в табл. 3 даних, в переважній більшості випадків $\frac{\sigma_{M0}}{\sigma_{K0}} \gg 1$. Це

Таблиця 3. Розрахункові залежності співвідношення провідностей $\sigma_{M0} / \sigma_{K0}$ від температури θ_M та від абсолютного вологовмісту трансформаторного масла W_M (масло Т–1500)

$\theta_M, ^\circ\text{C}$	$W_M, \text{ г/Т}$					
	2	5	8	10	15	20
20	12,60	3,78	2,78	2,69	3,18	4,37
30	20,48	6,59	5,32	5,52	8,07	14,48
40	31,12	10,41	8,82	9,50	15,49	31,66
50	44,71	15,27	13,30	14,62	25,32	55,50
60	61,19	21,15	18,71	20,83	37,33	85,14
70	80,22	27,91	24,93	27,95	51,14	119,42

Таблиця 4. Розрахункові залежності співвідношення провідностей $\sigma_K / \sigma_{K,6}$ від температури θ_M та від абсолютного вологовмісту трансформаторного масла W_M (масло Т–1500)

$\theta_M, ^\circ\text{C}$	$W_M, \text{ г/Т}$					
	2	5	8	10	15	20
20	1,0	8,2	27,4	51,7	196,1	638,5
30	1,1	8,6	26,1	45,9	140,6	351,0
40	1,3	9,9	28,7	48,6	133,5	292,7
50	1,7	12,3	34,7	57,5	148,8	304,2
60	2,3	16,2	44,9	73,5	183,9	361,3
70	3,2	22,3	61,4	99,8	244,5	469,3

дає підстави зробити припущення, що при протіканні постійного струму через чутливий елемент датчика практично вся напруга буде прикладена до паперу (електротехнічного картону).

Оцінка чутливості розраховувалась шляхом визначення відношення електропровідності σ_K чутливого елемента при різних значеннях абсолютного вологовмісту трансформаторного масла до значення електропровідності $\sigma_{K,6}$ при абсолютному вологовмісті масла у 2 г/т і температурі масла 20 °С (табл. 4). Розрахунки виконані для діапазону температур 20–70 °С та фіксованій напруженості електричного поля 10 000 В/см.

Аналіз отриманих результатів показує, що відносна чутливість запропонованого чутливого елемента змінюється нелінійно в діапазоні значених у табл. 4 значень вологовмісту трансформаторного масла та досягає максимального значення 35,5 при зміні вологості масла на 1 г/т, що свідчить про можливість застосування такого елемента для контролю зволоження трансформаторного масла.

Конструктивно чутливі елементи можуть мати різне виконання. При цьому, якщо, наприклад, застосувати чутливий елемент циліндричної форми, то опір чутливого елемента датчика можна оцінити за формулою

$$R = \frac{d}{\sigma_K \pi D l}, \quad (13)$$

де D – діаметр чутливого елемента датчика; l – довжина чутливого елемента датчика; d – товщина шару паперу; σ_K – електропровідність паперу (картону).

Безпосереднє застосування формули (13) ускладнене тим, що величина електропровідності паперу σ_K невідома. Тому, враховуючи існування залежностей вигляду (1), (2) і (6), а також беручи, що напруженість електричного поля в папері незмінна, формулу (13) можна подати у такому вигляді:

$$R = R_0 \exp(\alpha\theta + \beta\varphi_M), \quad (14)$$

де коефіцієнти R_0 , α , β мають бути визначені експериментально, оскільки вони залежать від конструкції чутливого елемента датчика та типу трансформаторного масла, в якому він буде розміщений. Ці коефіцієнти є індивідуальними для кожного датчика.

Висновки

Аналіз проведених розрахунків показує можливість застосування як чутливого елемента датчика вологості ізоляційного трансформа-

торного масла електротехнічного паперу для перетворювача кондуктометричного типу. Наведені в статті залежності та проведені розрахунки підтверджують наявність однозначного зв'язку між опором чутливого елемента та вологістю трансформаторного масла.

Визначено рекомендований діапазон напруженості електричного поля при вимірюванні опору шляхом прикладання до чутливого елемента постійної напруги та показано залежність результатів вимірювання від поточної температури масла.

Застосування датчика з чутливим елементом на базі електротехнічного паперу при спільному

використанні з мікропроцесорною системою обробки інформації, яка реалізує запропонований алгоритм визначення вологості масла по результатах вимірювання опору чутливого елемента, дасть змогу налагодити безперервний контроль (моніторинг) зволоження ізоляційного масла електрообладнання високої напруги у процесі його експлуатації та реалізувати алгоритми прогнозування надійності роботи обладнання.

Метою подальших досліджень є розроблення алгоритму розрахунку основних характеристик вологочутливого датчика, оптимізація його конструкції та аналіз абсорбційних характеристик.

1. *Мордкович А.Г., Горожанкин П.А.* О построении подсистем мониторинга, управления и диагностики оборудования подстанций сверхвысокого напряжения и их интеграции в АСУ ТП ПС // *Электрич. станции.* – 2007. – № 6. – С. 30–38.
2. *Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П. та ін.* Комплексный подход к диагностике высоковольтного оборудования подстанций 220–1150 кВ под рабочим напряжением в режиме эксплуатации // *Электротех. і електромех.* – 2010. – № 4 – С. 23–25.
3. *Сырцов А.И., Невзлин Б.И., Джасим Д.М.Д.* Влияние влаги на свойства трансформаторного масла // *Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту.* – 2011. – № 11 (186). – С. 385–387.
4. *Бланк Т.А., Экспериандова Л.П.* Развитие современных методов акваметрии химических веществ // *Вісн. Харків. нац. ун-ту. Хімія.* – 2008. – Вип. 16(39), № 820. – С. 27–38.
5. *ГОСТ 7822–75.* Масла нефтяные и смазки. Метод определения растворенной воды. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 32 с.
6. *ГОСТ 24614–81.* Жидкости и газы, не взаимодействующие с реактивом Фишера. Кулонометрический метод определения воды. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.
7. *Патент 84682* Україна, МКІ G 01 N 27/12. Спосіб вимірювання електричної ємності і визначення вологості досліджуваного об'єкта та пристрій для його здійснення (варіанти) / І.Г. Грушка, Я.І. Грушка. – № 200500714; Заявл. 26.01.2005; Опубл. 25.11.2008; Бюл. № 22. – 6 с.
8. *Патент 39894* Україна, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.С. Звягін. – № 200814033; Заявл. 05.12.2008; Опубл. 10.03.2009; Бюл. № 5. – 2 с.
9. *Патент 51222* Україна, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості / О.В. Заболотний, В.А. Заболотний, М.Д. Кошовий. – № 2002020867; Заявл. 04.02.2002; Опубл. 15.10.2004; Бюл. № 10. – 2 с.
10. *Патент 62125* Україна, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий, В.А. Заболотний. – № 2002120070; Заявл. 13.12.2002; Опубл. 15.12.2003; Бюл. № 12. – 2 с.
11. *Липштейн Р.А., Шахович М.И.* Трансформаторное масло. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
12. *Левит А.Г.* Особенности работы масло-барьерной изоляции преобразовательных трансформаторов высокого напряжения // *Электрич. станции.* – 1978. – № 5. – С. 68–71.
13. *Иерусалимов М.Е., Николенко А.Н.* Контроль увлажнения бумажно-масляной изоляции // *Электрич. сети и сист.* – Вып. 12. – 1976. – С. 102–110.
14. *Электротехнический справочник:* В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440 с.
15. *Соколов В.В.* Разработка методов повышения эффективности диагностики состояния изоляции мощных силовых трансформаторов высокого напряжения: Дис. ... канд. техн. наук. 05.14.12 – К.: Киев. политехн. ин-т, 1982 – 286 с.
16. *Куц П.С., Пикус И.Ф.* Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. – Минск: Наука и техника, 1979. – 294 с.
17. *Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.* Изоляция установок высокого напряжения: Учеб. для вузов / Под общ. ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 386 с.