

## БАЛАНС ВОЛОГОСТІ У ТРАНСФОРМАТОРАХ З ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Павлович Т.Р., студент, Проценко О.Р., к.т.н., доц., Холоєвський Н.І., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг*

**Вступ.** Наявність вологи в трансформаторі погіршує його ізоляцію, зменшуючи як електричну, так і механічну міцність. Взагалі, залишковий ресурс ізоляції зменшується майже наполовину за кожне подвоєння вмісту води а швидкість термічного зносу паперу пропорційна вмісту у ньому води [1]. Електричні розряди можуть виникати в області ізоляції з високою напруженістю через порушення рівноваги вологи, що призводить до низької напруги виникнення початкового розряду та більшої інтенсивності часткових розрядів. Міграція невеликої кількості вологи, як вважається, пов'язана з накопиченням заряду на міжфазних сухих зонах з посиленою ізоляцією [2]. Вода у трансформаторному маслі також створює ризик утворення бульбашок, коли десорбція води з целюлози збільшує локальну концентрацію газів у маслі [3].

**Мета роботи** полягає у дослідженні і аналізі існуючих класичних кривих балансу вологи у паперово-масляній ізоляції в умовах рівноваги для визначення можливості використання паперу у якості датчика автоматизованих систем контролю та моніторингу вологості масла.

**Матеріали і результати досліджень.** Протягом багатьох років ряд авторів повідомляли про набір кривих, які пов'язують вологу в маслі та папері. Однак детального огляду та порівняння для цих кривих проведено не було, тому в роботі зроблена спроба порівняння кривих, запропонованих Фабре-Пішоном [1] та Оомменом [4], як найбільш повних та всеохоплюючих.

Криві Фабре-Пішона (Норріса). Крива збалансованого вмісту вологи у ізоляційній системі «повітря-масло-целюлоза» наведена у [1] а їх модифікація, виконана Норрісоном, у [5]. При дослідженнях у якості паперу використовувався крафт-папір.

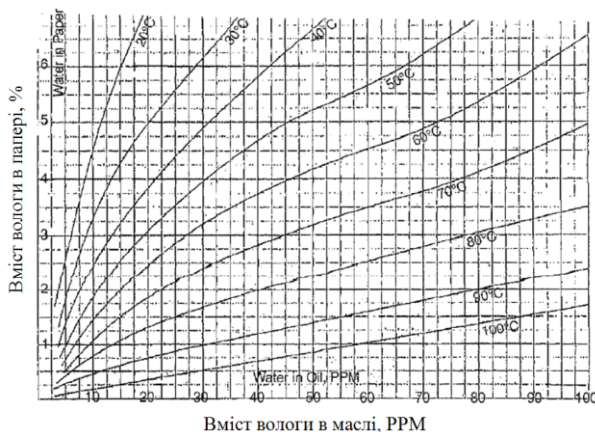


Рисунок 1 – Криві Норріса

Про криву вологості рівноваги у паперово-масляних системах було вперше повідомлено Фабром і Пішоном у 1960 році. Це найбільш широкий набір кривих, за допомогою яких були вивчені повітряно-паперово-масляні системи високовольтної ізоляції. Зокрема зазначено, що при перевищенні температури ізоляції (власне, масла і твердої ізоляції) відносно температури надмасляного газового простору, вміст вологи в ізоляції буде низьким. І навпаки, при однаковій температурі всіх трьох компонентів ізоляція буде більш зволожена.

Криві Ооммена. В основі метода Оомена закладено припущення, що криві рівноваги представляють ту ж відносну насиченість для масла і паперу, при тій самій температурі. Він об'єднав вміст вологи в маслі з кривими відносної вологості в повітрі та вміст вологи в папері з відносною вологістю в повітрі. В результаті отримав криві вмісту вологи в папері від вологості масла, прийнявши вологу в папері рівноважною волозі в маслі. Криві вологи у маслі та відносної вологості є прямими лініями та визначаються у співвідношенні:

$$X_w = X_w^s \cdot R.H.,$$

де  $X_w$  – вологість в маслі у PPM,  $X_w^s$  – водорозчинність в маслі у PPM, а  $R.H.$  – відносна вологість масла [4]. На основі цих припущень були побудовані наступні криві.

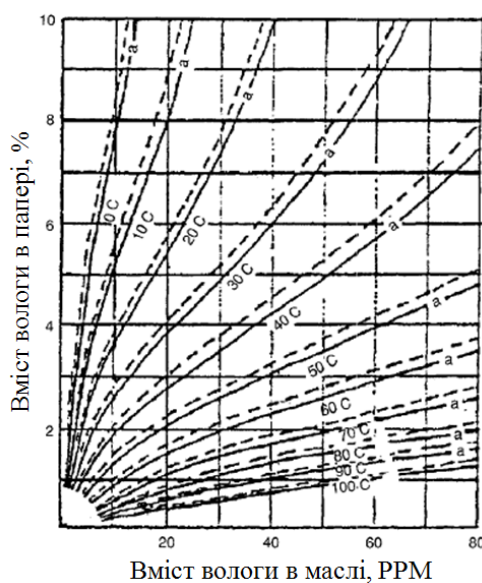


Рисунок 2 – Криві Ооммена

Штрихові лінії вказують на криві десорбції (дифузії вологи поза целюлозою), тоді як суцільні лінії вказують на адсорбційні криві (дифузії вологи в целюлозу). Для тієї самої відносної вологості вміст вологи в кривих десорбції трохи вище, ніж у кривих адсорбції.

Порівняння кривих Норріса та Ооммена. Через різницю у розчинності вологи в маслі, вологості в паперовому середовищі та відносній вологості повітря, а також різну точність вимірювання, криві, отримані різними дослідниками, відрізняються. Порівняння різних рівнів вологості та температури показано у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльні дані балансу вологості у трансформаторах з паперово-масляною ізоляцією

Крива Норріса (Фабре-Пішона)			Крива Ооммена		
Вміст вологи в маслі, PPM	Температура, °C	Вміст вологи в папері, %	Вміст вологи в маслі, PPM	Температура, °C	Вміст вологи в папері,%
20	30	5	20	30	4
20	40	3,8	20	40	3,0
20	80	1,3	20	80	0,6
50	40	6,75	50	40	5,3
50	50	5,25	50	50	2,85
50	80	2,25	50	80	1,3
80	60	5,4	80	60	3,8
80	70	4,1	80	70	2,9
80	80	3,1	80	80	2,1

**Висновки.** Вивчення декількох наборів класичних кривих рівноваги вологості та їх порівняння показують, що обов'язково потрібно звертати увагу на те, що залежно від методів, джерел даних і способів генерування, дані можуть суттєво відрізнятися. Зокрема, при малому вмісті води в маслі та високих температурах, результати визначення відносної вологості паперу за кривими різних авторів можуть відрізнятися на 20-50%. Однак за результатами досліджень, проведених останнім часом можна стверджувати що криві Ооммена найбільш повно відповідають експериментальним даним.

У разі, коли система не знаходиться в рівновазі, то криві рівноваги Фабре-Пішона (Норріса) та Ооммена не можуть бути використані для виявлення вологості масла, що є суттєвим недоліком. Тому перспективними можуть стати дослідження, які б дозволяли зробити висновок про стан вологості ізоляції у системах, які не знаходяться у рівновазі.

#### Перелік посилань

1. J. Fabre and A. Pichon, "Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers," 1960 *International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE)*, Paris, France, Paper 137, 1960.
2. A. J. Morin, M.Zahn, and J.R. Melcher, "Fluid Electrification Measurements of Transformer Pressboard/Oil Insulation in a Couette Charger," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 5, pp. 870-901, October 1991.
3. W A. Fessler, W J. McNutt, and T. O. Rouse, "Bubble Formation in Transformers," EPRI Report EL-5384, EPRI, Palo Alto, CA, August 1987.
4. T. V Oommen, "Moisture Equilibrium in Paper-Oil Systems," *Proceedings of the Electrical I Electronics Insulation Conference*, Chicago, IL, pp. 162-166, October 3-6, 1983.
5. E. T. Norris, "High Voltage Power Transformer Insulation," *Proceedings I.E.E.*, Vol. 110, No.2, pp. 433, February 1963.