



УДК 621.315.615.2

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-15

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
ВОЛОГОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА****Граняк Валерій Федорович**, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет**Ємчик Віктор Володимирович**, директор
Науково-дослідне господарство «Агрономічне»
ННБК «Всеукраїнський науково-навчальний консорціум»**Кожушко Олександр Вікторович**, студент
Вінницький національний аграрний університет**Valerii Hraniak**, Ph.D. of Eng., Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University**Viktor Yemchyk**, director SRF «Agronomichne»
USEC «All Ukrainian Scientific-educational Consortium»**Olexander Kozhushko**, student
Vinnytsia National Agrarian University

На сьогоднішній день переважна більшість технологічних процесів, як виробництва, так і сільського господарства, ґрунтується на використанні електричного обладнання. Аналогічна ситуація має місце і у побутовій сфері, де також можна відмітити суттєве зростання енергоспоживання протягом останніх десятиліть. Враховуючи це, є очевидним необхідність забезпечення передачі значних обсягів електричної енергії, що не можливе без використання трансформаторів та силових електричних апаратів, конструкція лівової частки яких передбачає ізоляцію струмоведучих частин та відведення надлишкової теплоти з використанням трансформаторного масла. До такого обладнання, зокрема, відносяться: масляні трансформатори, масляні та маломасляні вимикачі, що характеризуються достатньо низькою вартістю при достатньо високих номінальних струмах та напругах.

Одним із найбільш істотних недоліків зазначеного обладнання є необхідність постійного моніторингу стану трансформаторного масла, фізичні властивості якого значною мірою визначають діелектричну міцність та переважувальна здатність обладнання в цілому. При цьому масова частка вологи в останньому є одним з ключових показників, що визначають його діелектричні та теплопровідні властивості. Тож існуючі технічні регламенти експлуатації останнього передбачають регулярне лабораторне дослідження фізичних властивостей останнього при здійсненні технічного огляду обладнання, що, зазвичай, потребує доволі значних витрат часу. У свою чергу це призводить до зростання економічних збитків, пов'язаних з збільшенням тривалості планових наглядово-ремонтних робіт. Тож, враховуючи сказане, є очевидним, що розробка нових високоточних засобів експрес вимірювання вологості трансформаторного масла є актуальним завданням, що має значний практичний інтерес.

У статті отримано математичну модель зразка трансформаторного масла, що встановлює однозначну залежність між його вологістю та інтегральною діелектричною провідністю в діапазоні зміни вологості від 0 % до 0,6 %, що відповідає допустимому вмісту вологи в останньому. Показано, що отримана функціональна залежність інтегральної діелектричної проникності від вологості у межах досліджуваного діапазону має монотонно зростаючий характер. Також у роботі було розроблено конструкцію високочастотного сенсору вологості, побудованого на основі смугового несиметричного хвилеводу, у якому здійснюється первинне вимірювальне перетворення вологості у амплітуду вихідної електромагнітної хвилі. Розроблено математичну модель такого сенсора та отримано рівняння перетворення.

Для підтвердження адекватності зроблених теоретичних висновків було проведено експериментальне дослідження, на основі якого було встановлено, що сумарна відносна похибка не перевищує 2 %.

Ключові слова: трансформаторне масло, діелектрична проникність, вологість, діелектрична міцність, вимірювання, сенсор.

Ф. 37. Рис. 8. Літ. 19.

1. Вступ

Вода є однією з найбільш поширених речовин, що входить до складу переважної більшості матеріалів, як органічного, так і неорганічного походження. Масова частка води, що міститься у різних матеріалах, залежить як від здатності матеріалу поглинати (сорбувати) або утримувати на поверхні (адсорбувати) воду, так і від умов, у яких знаходиться (експлуатується) той чи інший субстрат [1].

Вміст вологи суттєво впливає на фізичні та електротехнічні властивості неметалічних матеріалів, в тому числі і трансформаторного масла. Зокрема збільшення масової частки в останньому суттєво погіршує його діелектричну міцність, провокуючи виникнення пробоя між струмоведучими частинами силових трансформаторів, масляних вимикачів та іншого обладнання, що передбачає його застосування [2].

Діючі протоколи, що регламентують умови технічного обслуговування цілої групи силового електрообладнання передбачають здійснення регулярних вимірювань вологості трансформаторного масла. А так як на сьогоднішній день все більшого поширення набуває перехід від виконання планового технічного обслуговування до обслуговування за потребою [3, 4], можна зробити висновок, що розробка сенсорів вологості трансформаторного масла, які були б придатними для здійснення високоточного експрес вимірювання чи роботи сумісно з системами контролю в режимі реального часу є актуальною науково-прикладною задачею.

2. Постановка проблеми

Найбільш широко поширені на сьогоднішній день засоби вимірювання вологості трансформаторного масла працюють переважно в ручному режимі, мають незадовільні точність та швидкодію вимірювання [5]. Отже, очевидно є необхідність подальшого наукового дослідження, спрямованого на розвиток відомих методів та розробку нових засобів підвищеної точності та швидкодії вимірювального контролю вологості цих речовин.

Перспективними, з точки зору розв'язання цієї науково-прикладної задачі, є високочастотні методи вимірювання вологості, що характеризуються високою швидкістю, безінерційністю та об'ємним вимірюванням вологості зразка [6]. Про те, через недостатню дослідженість, їх широке застосування є суттєво обмеженим.

З огляду на викладене вище, очевидно є доцільність розробки високочастотних сенсорів вологості, придатних як для здійснення експрес контролю так і для вимірювань в режимі реального часу роботи обладнання.

3. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Однією з особливостей об'єкта контролю є те, що і трансформаторне масло і вода належать до одного класу речовин з відносною магнітною проникністю, значення якої близьке до одиниці [7]. Враховуючи цей факт, магнітні параметри зразка по мірі зростання його вологості можна вважати постійними. Тому у подальших розрахунках доцільно враховувати лише зміну діелектричних властивостей, які залежать від вологості об'єкта контролю (ОК). При цьому гранично допустима вологість трансформаторного масла становить (0,55...0,6) %, що обумовлює необхідний діапазон вимірювання.

Як показано вище, при зміні вологості трансформаторного масла його відносна діелектрична проникність монотонно зростає [8]. До того ж, враховуючи відсутність хімічних зв'язків між маслом та розподіленою у ньому вологою [9], його можна розглядати як особливий вид в'язкої емульсії, у якій вкраплення вологи, по суті, є нерозчинною дисперсною фазою [10]. Структура такого об'єкта контролю наведена на рис. 1.

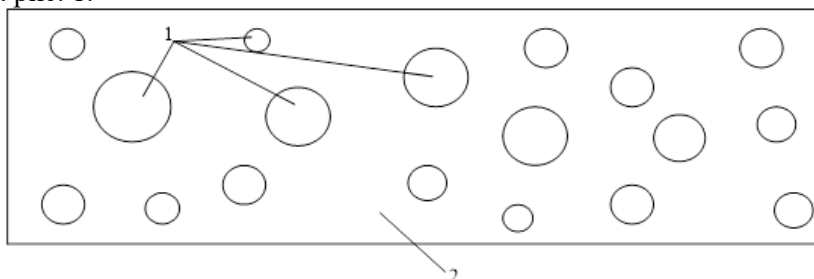


Рис. 1. Структура об'єкта контролю: 1 – вкраплення вологи; 2 – трансформаторне масло



Як показує аналіз літературних джерел, існує цілий ряд відмінних між собою функціональних залежностей, що описують зв'язок ефективної (інтегральної) діелектричної проникності з об'ємною часткою речовини-наповнювача. Зокрема, функціональні залежності, наведені у роботах [8] мають суттєві відмінності, що обумовлені різними введеними під час їх отримання припущеннями, як то симетричний характер розподілу дисперсної фази у зразку (рівняння Бруггеманна та похідне від нього рівняння Бруггемана-Ханаї [11]), невелика різниця між діелектричною проникністю середовища та вкраплень (залежність, приведена у роботах Ландау-Ліфшица), тощо. Проте, оскільки діелектрична проникність води та жиру відрізняється приблизно у 40 разів, масова частка вологи ОК змінюється у діапазоні до 0,5 % та вкраплення вологи розміщені у довільному порядку та їх діаметр коливається у діапазоні від 10 до 60 мкм [5], що суперечить прийнятим при виведенні частини функціональних залежностей гіпотез, то для отримання функціонального зв'язку між інтегральною діелектричною проникністю та вологістю для обраного ОК доцільним є застосування лише тих функціональних залежностей, при отриманні яких не застосовувалися припущення, що протирічать його фізичним властивостям. Найбільш поширеним серед таких математичних моделей є рівняння Максвела – Гарнета,

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_0} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_0}, \quad (1)$$

ε_{eff} – інтегральна (ефективна) діелектрична проникність зразка; ε_0 – діелектрична проникність матричної речовини; ε_i – діелектрична проникність i -го наповнювача; v_i – об'ємна частка i -го наповнювача.

Яке забезпечує доволі високу точність отриманих результатів для речовин, що характеризуються відсутністю молекулярних зв'язків між матричною речовиною та дисперсною фазою, розміщеною у вигляді вкраплень близької до кулястої форми при об'ємній частці вкраплень не більше 30 % [12].

Не менш цікавою є і залежність, приведена у роботі [12], що була отримана на основі рівняння (1), шляхом його розв'язку відносно ε_{eff} :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_0 + 2 \sum_{i=1}^n v_i \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_0} \right)}{1 - \sum_{i=1}^n v_i \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_0} \right)}, \quad (2)$$

Тож, з відси, діелектрична проникності ОК будемо розраховувати наступним чином:

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_M + 2v \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_M}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_M} \right)}{1 - v \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_M}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_M} \right)}, \quad (3)$$

де ε_B – відносна діелектрична проникність води; ε_M – відносна діелектрична проникність трансформаторного масла; v – об'ємна частка вологи у зразку.

При чому об'ємна частка води може бути визначена з відомого співвідношення:

$$v = \frac{V_B}{V_B + V_M}, \quad (4)$$

де V_B, V_M – об'єм, що займає вода та трансформаторного масла, відповідно.

Оскільки вміст вологи у зразку визначається відомим співвідношенням мас вологи та масла, які у свою чергу можна подати через густину та об'єм відповідних фракцій, вологість об'єкту контролю можна знайти з наступної функціональної залежності:

$$W = \frac{V_B \cdot \rho_B}{V_B \cdot \rho_B + V_M \cdot \rho_M} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

де ρ_B, ρ_M – відповідно, густина води та молочного трансформаторного масла.

Звідси, підставивши (5) у (4), отримуємо функціональну залежність, що однозначно пов'язує об'ємну частку води з вологістю зразка:



$$\nu = \frac{\rho_M \cdot W}{100 \cdot \rho_B - W \cdot (\rho_B - \rho_M)} \quad (6)$$

Відповідно, підставивши (6) у (3) та здійснивши прості математичні перетворення, отримаємо:

$$\varepsilon_3 = \frac{100\rho_B\varepsilon_B\varepsilon_M + 200\rho_B\varepsilon_M^2 + W(\rho_M\varepsilon_B\varepsilon_M + 2\rho_M\varepsilon_M^2 + 2\rho_M\varepsilon_B - 2\rho_M\varepsilon_M - \rho_B\varepsilon_B\varepsilon_M - 2\rho_B\varepsilon_M^2)}{100\rho_B\varepsilon_B + 200\rho_B\varepsilon_M - W(\rho_B\varepsilon_B + 2\rho_B\varepsilon_M - 3\rho_M\varepsilon_M)} \quad (7)$$

Введемо наступні заміни:

$$F_1 = 100\rho_B\varepsilon_B\varepsilon_M + 200\rho_B\varepsilon_M^2, \quad (8)$$

$$F_2 = \rho_M\varepsilon_B\varepsilon_M + 2\rho_M\varepsilon_M^2 + 2\rho_M\varepsilon_B - 2\rho_M\varepsilon_M - \rho_B\varepsilon_B\varepsilon_M - 2\rho_B\varepsilon_M^2, \quad (9)$$

$$F_3 = 100\rho_B\varepsilon_B + 200\rho_B\varepsilon_M, \quad (10)$$

$$F_4 = \rho_B\varepsilon_B + 2\rho_B\varepsilon_M - 3\rho_M\varepsilon_M. \quad (11)$$

Тоді, функціональна залежність ефективної діелектричної проникності від вологості ОК може бути подана у наступному вигляді:

$$\varepsilon_3 = \frac{F_1 + WF_2}{F_3 - WF_4} \quad (12)$$

Для встановлення характеру залежності діелектричної проникності зразка від масової частки розміщеної у ньому води в діапазоні зміни вологості об'єкта контролю від 0 % до 0,5 % промодельємо математичну залежність (12). При моделюванні прийнято, що температура навколишнього середовища становить 20 °С. Результати моделювання представлено на рис. 2

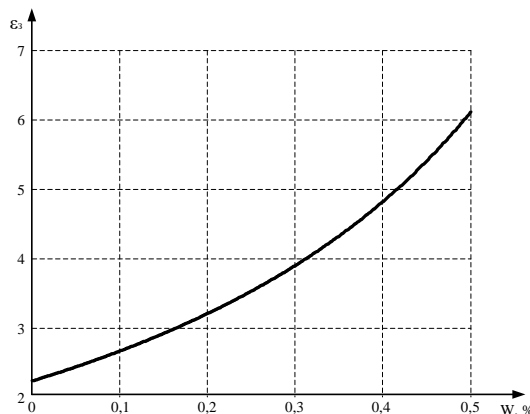


Рис. 2. Теоретична залежність інтегральної діелектричної проникності від вологості зразка

Як видно з рис. 2, при зростанні вологості відносна діелектрична проникність зразка монотонно зростає квазілінійно. Це пояснюється збільшенням частки води у зразку, яка характеризується більшим значенням діелектричної проникності у порівнянні з трансформаторним маслом.

Як сказано вище, перспективним, з точки зору підвищення точності вимірювального контролю вологості, є використання височастотних хвильовідних методів вимірювання. Тому, у якості первинного вимірювального перетворювача (сенсора) пропонується смуговий несиметричний сенсор, побудований за принципом смугового несиметричного хвильоводу, який повинен характеризуватися інваріантністю до впливних величин навколишнього середовища, мати високу швидкодію та просте конструктивне виконання [13] (рис. 3).

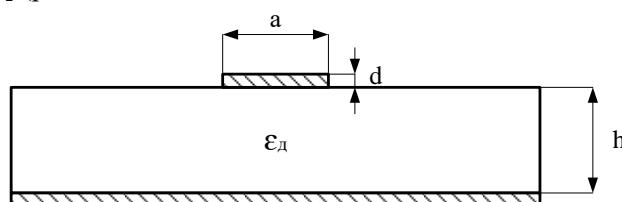


Рис. 3. Поперечний переріз смугового несиметричного хвильоводу

Особливістю смугового несиметричного сенсора вологості, є те, що структура електромагнітного поля лінії має досить складний характер. Для практичних задач користуються спрощеним поданням електромагнітної хвилі, що поширюється у такому хвилеводі, у вигляді ТЕМ-хвилі [14]. При чому, на відносно низьких частотах (ВЧ діапазону) прийняте спрощення не вносить суттєвої похибки у розрахунки [14]. Тож, ввівши обмеження на частоту інформативної хвилі, в подальшому будемо вважати, що інформативна хвиля є хвилею ТЕМ-типу.

Як доведено в [15], силові лінії магнітного поля концентруються в при крайовій зоні центрального провідника. Тому, враховуючи належність трансформаторного, води і діелектрика, що розміщений між центральним провідником та заземленням, до одного класу речовин з відносною магнітною проникністю, значення якої близьке до одиниці, магнітні параметри такої хвилі можна вважати постійними [7]. Тому у подальших розрахунках враховано лише зміну діелектричних параметрів.

Оскільки електромагнітна хвиля, що поширюється у смуговому несиметричному сенсорі вологості перекривається як конструктивними елементами самого сенсора, так і об'єктом контролю, то в процесі виведення математичної моделі сенсора комплексно досліджено систему «сенсор-зразок», структурна схема якої представлена на рис. 4.

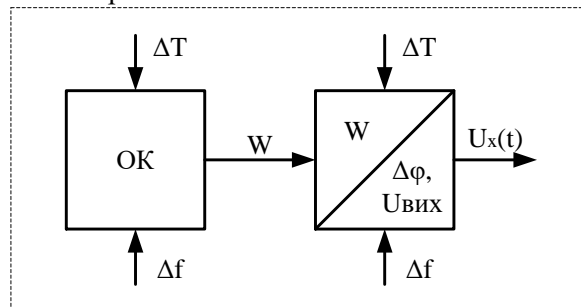


Рис. 4. Структурна схема системи «сенсор-зразок»

Як показано у [14, 15], еквівалентна (ефективна) діелектрична проникність такої системи може бути визначена наступним виразом:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_z}{2} + \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_z}{2H}, \quad (13)$$

де ε_z – відносна діелектрична проникність зразка; ε_d – відносна діелектрична проникність діелектрика підложки.

У виразі (13) параметр H враховує співвідношення між товщиною підложки h та шириною центрального провідника a і визначається за формулою [16]:

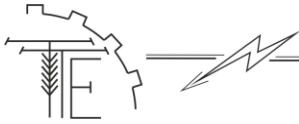
$$H = \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a}}. \quad (14)$$

де h – товщина діелектрика підложки; a – ширина центрального провідника.

Як було показано у (13), еквівалентна діелектрична проникність смугового несиметричного сенсора вологості функціонально пов'язана з діелектричною проникністю зразка та матеріалу підложки. Оскільки, зміщення фази інформативної хвилі визначається як різниця фаз між інформативним каналом та опорним каналом, фаза у якому відповідає фазі ненавантаженого сенсора (без об'єкта контролю), розглянемо процеси, що відбуваються у смуговому несиметричному хвилеводі без введення зразка. Відповідно, за умови відсутності зразка на поверхні хвилеводу (наявності на його місці повітря з діелектричною проникністю близько 1), ефективна діелектрична проникність визначається, як [16]:

$$\varepsilon_{efon} = \frac{\varepsilon_d + 1}{2} + \frac{\varepsilon_d - 1}{2H}. \quad (15)$$

Для отримання математичної моделі затухання інформативної хвилі було застосовано введені вище обмеження на частоту інформативної хвилі, вважаючи, що інформативна хвиля є хвилею ТЕМ-типу. Звідси, скориставшись введеними спрощеннями, можна записати залежність питомих втрат потужності у смуговому несиметричному хвилеводі [17].



$$\Delta P_{em} = \frac{2,23 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot R \cdot E_0^2 \cdot h}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{\left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_A - 1 \right] \cdot \left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_B - 1 \right]}{\frac{r_A \cdot r_B \cdot k^2}{4}} \right) =$$

$$= C_1 \ln \left(\frac{4C_2}{k^2} \right), \quad (16)$$

де R – поверхневий опір матеріалу смугового хвильоводу; μ – відносна магнітна проникність середовища; E_0 – напруженість однорідного електричного поля в несиметричному смуговому хвильоводі; h – відстань між струмонесучим (центральним) провідником та заземленою пластиною; r_A , r_B – корені трансцендентного рівняння:

$$r - \ln(r) - 1 - \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot h} - \left(\frac{2d}{h} + \sqrt{\frac{2d}{h}} \right) \cdot (r - 1) = 0, \quad (17)$$

де a – ширина струмонесучого (центрального) провідника; d – товщина струмонесучого (центрального) провідника.

C_1 , C_2 – сталі для конкретного зразка хвильоводу коефіцієнти; k – коефіцієнт, що враховує товщину струмонесучого (центрального) провідника та з допустимим наближенням може бути розрахований:

$$k = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot d}{h}}. \quad (18)$$

Відповідно, для смугового несиметричного хвильоводу довжиною l сумарні втрати будуть становити:

$$P_{em} = \frac{2,23 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot R \cdot E_0^2 \cdot h}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{\left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_A - 1 \right] \cdot \left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_B - 1 \right] \cdot h}{2 \cdot r_A \cdot r_B \cdot d} \right) \cdot l =$$

$$= C_1 \ln \left(\frac{hC_2}{2 \cdot d} \right) \cdot l. \quad (19)$$

Також, за відомою формулою [15] розраховуємо потужність, що проходить через поперечний переріз струмонесучого (центрального) провідника, який знаходиться на відстані, рівній довжині інформативної хвилі:

$$\Delta P_{np} = 8,44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon_{eff}}{\mu}} \cdot E_0^2 \cdot h^2 \cdot \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right). \quad (20)$$

Тоді, потужність, що надходить на вихід смугового несиметричного хвильоводу може бути розрахованою, як:

$$P_{np} = 8,44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon_{eff}}{\mu}} \cdot E_0^2 \cdot h^2 \cdot \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right) \cdot \frac{\lambda_n}{l}, \quad (21)$$

де λ_n – довжина електромагнітної хвилі, що поширюється у хвильоводі.

Врахувавши, що довжина електромагнітної хвилі, яка поширюється у хвильоводі, за відомою математичною залежністю [17], може бути записана у вигляді:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \quad (22)$$

де λ_0 – довжина інформативної електромагнітної хвилі у вакуумі.



З урахуванням (19) та (21), отримаємо вираз для коефіцієнту послаблення потужності електромагнітної хвилі в смуговому несиметричному хвильоводі у такому вигляді:

$$\beta = 1 + \frac{2,23 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon_{\text{eff}} \cdot R \cdot \ln\left(\frac{C_2 h}{2d}\right) \cdot l^2}{8,44 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \cdot \lambda_0 \cdot \sqrt{\mu}}. \quad (23)$$

Як впливає з (23), оскільки решта параметрів для конкретного хвильоводу є постійними, коефіцієнт послаблення потужності залежить лише від відносної діелектричної проникності зразка, що може бути розрахованою за (13).

Тоді, використавши у якості матеріалу струмонесучого (центрального) провідника металу, який характеризується високою провідністю, поверхневий опір матеріалу смугового хвильоводу можемо розрахувати за виразом [15]:

$$R = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\gamma}}, \quad (24)$$

де f – частота хвилі, що поширюється у смуговому несиметричному хвильоводі; γ – провідність струмонесучого (центрального) провідника, що розраховується наступним співвідношенням:

$$\gamma = \frac{d \cdot a}{L \cdot \rho_{\text{мід}}}, \quad (25)$$

де $\rho_{\text{мід}}$ – питомий опір матеріалу струмонесучого (центрального) провідника.

З урахуванням (2), (24) і (25), та ввівши наступну заміну:

$$A = \frac{2,23 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f^3 \cdot l^5 \cdot \rho_{\text{мід}}}{d \cdot a}} \cdot \ln\left(\frac{C_2 h}{2d}\right)}{8,44 \cdot d \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \cdot c}, \quad (26)$$

(23) можна подати у вигляді:

$$\beta = 1 + A \left(\frac{\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon}{2\mu} + \frac{\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon}{2\mu H} \right). \quad (27)$$

У зв'язку з тим, що потужність електромагнітної хвилі може бути розрахована за відомим виразом [18],

$$P = I \cdot U \cdot \cos(\phi), \quad (28)$$

де I – діюче значення струму; U – діюче значення напруги; $\cos(\phi)$ – коефіцієнт потужності, то справедливим буде рівняння:

$$I_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вх}} \cdot \cos(\phi_{\text{вх}}) = \beta \cdot I_{\text{вих}} \cdot U_{\text{вих}} \cdot \cos(\phi_{\text{вих}}), \quad (29)$$

де $I_{\text{вх}}$, $I_{\text{вих}}$ – діюче значення струму на вході та виході смугового несиметричного хвильоводу відповідно; $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вих}}$ – діюче значення напруги на вході та виході смугового несиметричного хвильоводу відповідно; $\cos(\phi_{\text{вх}})$, $\cos(\phi_{\text{вих}})$ – коефіцієнт потужності на вході та виході смугового несиметричного хвильоводу відповідно.

Відповідно до класичних підходів лінію передачі з зосередженими параметрами, якою є смуговий несиметричний хвильовід, представимо у вигляді схеми заміщення, яка наведена на рис. 5 [14].

У наведеній на рис. 5 заступній схемі еквівалентна провідність G характеризує втрати енергії через діелектрик підложки, повітряний прошарок та досліджуваний зразок, а еквівалентний опір R – теплові втрати у центральному провіднику. Крім того еквівалентні ємність C та індуктивність L втрачують енергію, що запасється у лінії [14].

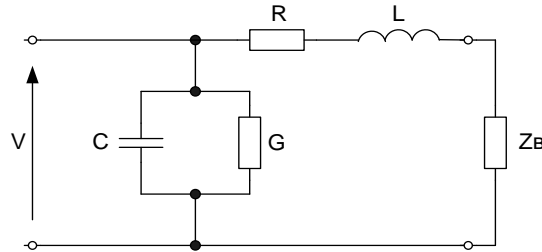


Рис. 5. Електрична схема заміщення смугового несиметричного хвильоводу

При чому, для ВЧ діапазону справедливими є нерівності [15]:

$$X_c \ll X_L, \quad G \gg R. \quad (30)$$

А так як R та L характеризують втрати та накопичення енергії у струмонесучому (центральному) провіднику [14], параметри якого не залежать від вологості зразка, то з точністю, що не вносить суттєвої похибки у результат вимірювання можна записати:

$$U_{\text{вх}} = \beta \cdot U_{\text{вих}}. \quad (31)$$

Тоді, підставивши (27) у (31) та виконавши математичні перетворення, отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}}}{1 + A \cdot \left(\frac{\epsilon_0 + \Delta\epsilon}{2\mu} + \frac{\epsilon_0 - \Delta\epsilon}{2\mu H} \right)}. \quad (32)$$

Введемо такі заміни:

$$B_1 = U_{\text{вх}} \cdot F_3 \cdot F_1 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (33)$$

$$B_2 = U_{\text{вх}} \cdot F_4 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (34)$$

$$B_3 = F_3 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (35)$$

$$B_4 = \left(\frac{2,23 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{f^5 \cdot \rho_{\text{мід}} \cdot \pi \cdot f^3 \cdot \ln\left(\frac{C_2 h}{2d}\right)}}{8,44 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \cdot c \cdot \sqrt{d \cdot a}} \right) \times \left(\frac{\epsilon_d}{2\mu} + \frac{\epsilon_d}{2\mu H} \right) \cdot F_2 \cdot (H - 1) + 2\mu H \cdot F_3. \quad (36)$$

Підставивши (33) – (36) в (32), матимемо:

$$U_{\text{вих}} = \frac{B_1 - B_2 \cdot W}{B_3 - B_4 \cdot W}. \quad (37)$$

Встановлена залежність (37) показує однозначний зв'язок між вологістю зразка та діючим значенням напруги на виході смугового несиметричного хвильоводу, та по своїй суті, є рівнянням перетворення смугового сенсора вологості.

4. Виклад основного матеріалу

Для підтвердження адекватності даної математичної моделі проведено експериментальні дослідження, з використанням несиметричного смугового хвильоводу з гітенаксовою підложкою, довжиною 1854 мм, товщиною підложки 4 мм, шириною центрального провідника 2,5 мм та товщиною центрального провідника 0,08 мм, діюче значення напруги на вході смугового несиметричного сенсора 500 мВ, коефіцієнт підсилення вихідного сигналу - 10. При дослідженні вихідної напруги сенсора були використанні: вимірювач напруги «ФК2 – 12» та генератор G сигналів високочастотний «Г4 – 107». Структурну схему та фото установки, що використана у дослідженні, приведено на рис. 6 та рис. 7.

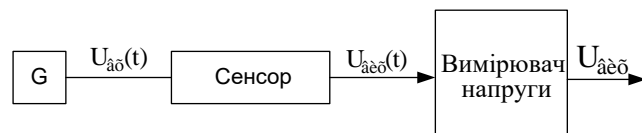


Рис. 6. Структурна схема експериментальної установки



Рис. 7. Фото експериментальної установки

При математичному моделюванні функції перетворення (37) та фізичному моделюванні сенсора отримано результати, що наведені рис. 8 [19].

Як видно з порівняння експериментальних та теоретичних значень, за умови накладених вище обмежень, сумарна відносна похибка, що складається з похибки даної моделі, інструментальної похибки апаратного забезпечення та суб'єктивної похибки зняття вимірюваної інформації не перевищує 2 %, статична характеристика смугового несиметричного сенсора при перетворенні вологості у амплітуду вихідної напруги інформативної хвилі має квазілінійний характер, а чутливість сенсора монотонно зростає при зменшенні частоти інформативної хвилі (рис. 8).

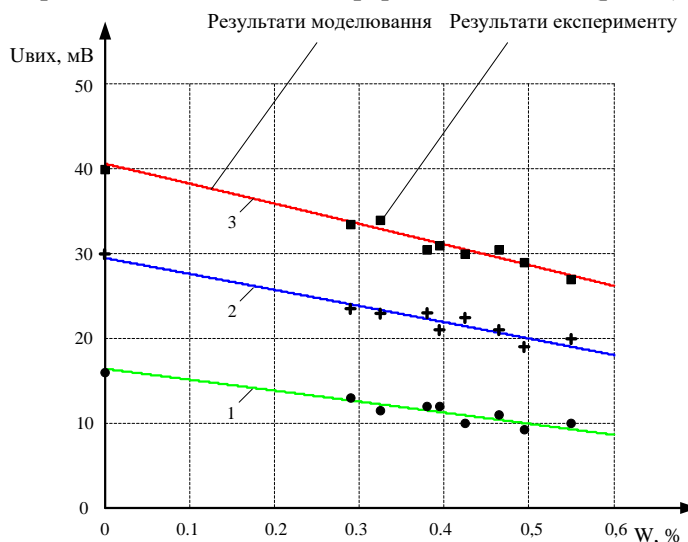


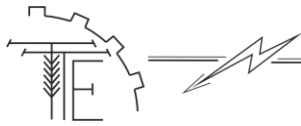
Рис. 8. Теоретичні та експериментальна статичні характеристики смугового несиметричного сенсора вологості, для деяких значень частоти інформативних хвиль:
1 – 400 МГц; 2 – 300 МГц; 3 – 250 МГц

6. Висновки

1. Отримано рівняння перетворення вологості трансформаторного масла у інтегральну відносну діелектричну проникність. Показано, що в діапазоні зміни вологості трансформаторного масла зростання вологості призводитиме до монотонного зростання інтегральної діелектричної проникності за нелінійною залежністю.

2. Запропоновано конструктивне виконання сенсора вологості трансформаторного масла у вигляді смугового несиметричного хвилеводу, що є придатним як для побудови засобів експрес вимірювання вологості так і роботи сумісно з системами автоматизованого контролю в режимі реального часу. Розроблено його математичну модель та отримано рівняння перетворення, що однозначно пов'язує вологість досліджуваної проби з амплітудою інформаційної електромагнітної хвилі.

3. З метою підтвердження адекватності запропонованих математичних проведено серію експериментальних досліджень, за результатами яких було встановлено, що сумарна відносна похибка, яка складається з похибки даної моделі, інструментальної похибки апаратного забезпечення та суб'єктивної похибки зняття вимірюваної інформації не перевищує 2 %.



Список використаних джерел

1. Rodrigues A., Sardinha R. A., Pita G. *Fundamental Principles of Environmental Physics*. New York : Springer, 2021. 422 p.
2. Плешков П. Г., Мануйлов В. Ф., Савеленко І. В. Організація системи моніторингу силових трансформаторів. *Наукові записки: збірник наукових праць*. 2010. № 10, ч. 2. С. 250–255.
3. Iserman R. *Fault–diagnosis applications. Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault–tolerant systems*. New York : Springer, 2011. 354 p.
4. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Bogachuk V. V., Vedmitskiy Y. G. at all. Phase noncontact method and procedure for measurement of axial displacement of electric machine's rotor. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments* : Proc. SPIE 10808, 2018. 7 p.
5. Демида Б., Гапесєва О. Автоматизована система моніторингу промислових трансформаторів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. №. 686. С. 23–33.
6. Korotcenkov G. *Handbook of Humidity Measurement, Volume 2. Electronic and Electrical Humidity Sensors*. Boca Raton : CRC Press, 2019. 404 p.
7. Gubskiy Y., Nizhenkovska I. *Biological and Bioorganic Chemistry*. In 2 books. Book 2. Biological Chemistry. Kyiv : Medicine, 2020. 544 p.
8. Білінський Й. Й., Юкиш М. В., Онушко В. В. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 5. С. 18–22.
9. Korotcenkov G. *Handbook of Humidity Measurement*. CRC Press, 2020. 390 p.
10. Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. Метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків з використанням ВЧ сенсора на базі смугового несиметричного хвильоводу. *XLI науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 13–15 березня 2012 р. Вінниця : ВНТУ, 2013 URL: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/ineem/txt/granyak2.pdf> (дата звернення: 21.06.2022)
11. Optical sensor of harmful air impurity concentration / I. Gunko at all. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2021. №. 97(7). P. 76–79.
12. Криворучко Я. С., Лерман Л. Б., Шкода Н. Г. Багатокомпонентні гетерогенні системи: ефективна діелектрична проникність та поглинання. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. 2012. № 66. С. 167–173.
13. Кухарчук В. В., Богачук В. В., Граняк В. Ф. Високочастотний метод і цифровий засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків. *Наукові праці ВНТУ*. 2012. №1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/308> (дата звернення: 21.06.2022).
14. Шульга А. В., Зінгер Я. Л., Адаменко В. О. Тривимірне моделювання радіоелектронної апаратури. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 153 с.
15. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львів : Львівська політехніка, 2016. 336 с.
16. Kuharchuk V. V., Hraniak V. F. Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric. *Метрологія та прилади*. 2013. №4. С. 3–8.
17. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В. С. Довідник з радіомоніторингу. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. 588 с.
18. Форкун Я. Б. Теоретичні основи електротехніки. Харків : ХНАМГ, 2009. 78 с.
19. Дослідження залежності параметрів затухання та зміщення фази електромагнітних хвиль від вологості середовища їх поширення / Кухарчук В. В. та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. №4. С. 103–106.

References

- [1] Rodrigues, A., Sardinha, R. A., Pita, G. (2021). *Fundamental Principles of Environmental Physics*. New York : Springer [in English].
- [2] Plieshkov, P. H., Manuilov, V. F., Savelenko, I. V. (2010). Orhanizatsiia systemy monitorynhu sylovykh transformatoriv [Organization of the monitoring system of power transformers]. *Naukovi zapysky: zbirnyk naukovykh prats – Scientific notes: a collection of scientific papers*, 10 (2), 250–255 [in Ukrainian].
- [3] Iserman, R. (2011). *Fault–diagnosis applications. Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault–tolerant systems*. New York : Springer [in English].
- [4] Hraniak, V.F., Kukharchuk, V.V., Bogachuk, V.V., Vedmitskiy, Y.G. at all. (2018). Phase noncontact



- method and procedure for measurement of axial displacement of electric machine's rotor. Proceedings from MIIM '12: *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. SPIE 10808 [in English].
- [5] Demyda, B., Gapeeva, O. (2010). Avtomatyzovana systema monitorynhu promyslovykh transformatoriv [Automated monitoring system of industrial transformers]. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*, 686. 23–33 [in Ukrainian].
- [6] Korotcenkov, G. (2019). *Handbook of Humidity Measurement, Volume 2. Electronic and Electrical Humidity Sensors*. Boca Raton : CRC Press [in English].
- [7] Gubskiy, Y., Nizhenkovska I. (2020). *Biological and Bioorganic Chemistry. In 2 books. Book 2. Biological Chemistry*. Kyiv: Medicine [in English].
- [8] Bilinskyi, Y.Y., Yukysh, M.V., Onushko V.V. (2010). Model perenesennia vyprominiuvannia v seredovyschi volohoho hazu ta vyznachennia yoho vidnosnoi volohosti [Model of radiation transfer in a moist gas environment and determination of its relative humidity]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 5. 18–22 [in Ukrainian].
- [9] Korotcenkov, G. (2020). *Handbook of Humidity Measurement*. CRC Press [in English].
- [10] Hraniak, V.F., Kukharchuk V.V. (2012). Metod ta zasib vymiryuvannia volohosti heterohennykh dyspersnykh dielektrykiv z vykorystanniam VCh sensora na bazi smuhovoho nesymetrychnoho khvylevodu [Method and means of measuring the humidity of heterogeneous dispersed dielectrics using a HF sensor based on a band asymmetric waveguide]. Proceedings from MIIM '12: *XLI naukovo-tekhnichna konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu ta studentiv VNTU – XLI scientific and technical conference of professors and teaching staff and students of VNTU*. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/ineeem/txt/granyak2.pdf> [in Ukrainian].
- [11] Gunko, I., Hraniak, V., Yaropud, V., Kupchuk, I. & Rutkevych, V. (2021). Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przeglad Elektrotechniczny*, 7. 76–79 [in English].
- [12] Kryvoruchko, Y.S., Lerman, L.B., Shkoda, N.G. (2012). Bahatokomponentni heterohenni systemy: efektyvna dielektrychna pronyknist ta pohlynannia [Multicomponent heterogeneous systems: effective permittivity and absorption]. *Visnyk NTU «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» – Bulletin of NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 66. 167–173 [in Ukrainian].
- [13] Kukharchuk, V.V., Bohachuk, V.V., & Hraniak, V.F. (2012). Vysokochastotnyi metod i tsyfrovyy zasib vymiryuvannia volohosti heterohennykh dyspersnykh dielektrykiv [High-frequency method and digital means of measuring the humidity of heterogeneous dispersed dielectrics]. *Naukovi pratsi VNTU – Scientific works of VNTU*, 1 Retrieved from <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/308> [in Ukrainian].
- [14] Shulga, A.V., Singer, Y.L., & Adamenko V.O. (2017). *Tryvymirne modeliuvannia radioelektronnoi aparatury [Three-dimensional modeling of radio-electronic equipment]*. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky [in Ukrainian].
- [15] Horbaty, I.V., & Bondarev, A.P. (2016). *Telekomunikatsiini systemy ta merezhi. Pryntsypy funktsionuvannia, tekhnologii ta protokoly [Telecommunication systems and networks. Principles of operation, technologies and protocols]*. Lviv: Lviv Polytechnic [in Ukrainian].
- [16] Kuharchuk, V.V., Hraniak, V.F. (2013). Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric. *Metrolohiia ta prylady – Metrology and devices*, 4, 3–8 [in English].
- [17] Slobodyaniuk, P.V., Blagradnyi, V.G., Stupak, V.S. (2008). *Dovidnyk z radiomonitorynhu [Handbook of radio monitoring]*. Nizhin: Aspect-Polygraph [in Ukrainian].
- [18] Forkun, Y.B. (2009). *Teoretychni osnovy elektrotekhniky [Theoretical foundations of electrical engineering]*. Kharkiv: KNAMG [in Ukrainian].
- [19] Kukharchuk, V.V., Bogachuk, V.V., Dmitriev, Y.O., Hraniak, V.F. (2011). Doslidzhennia zalezhnosti parametriv zatukhannia ta zmishchennia fazy elektromahnitnykh khvyl vid volohosti seredovyscha yikh poshyrennia [Study of the dependence of parameters of attenuation and phase shift of electromagnetic waves on the humidity of the environment of their propagation]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4. 103–106 [in Ukrainian].

MATHEMATICAL MODEL OF THE PRIMARY MEASURING CONVERTER OF HUMIDITY TRANSFORMER OIL

Today, the vast majority of technological processes, both production and agriculture, are based on the use of electric machines. Among which, a significant part of production equipment requires the use of electric motors, the power of which exceeds hundreds of kilowatts. Such electric machines have also become widespread as generating equipment, where they are an integral part of power plants, both using traditional energy sources (thermal power plants, nuclear power plants, etc.), and renewable (hydroelectric power plants, wind farms, etc.),



where the unit power of a single electrical machine is usually higher than in other sectors of economy.

When operating such equipment, systems for monitoring a significant number of technological parameters are often used, and in real time it characterizes the modes of their operation. This approach makes it possible to increase the reliability of operation and, with a fairly high probability, to avoid large-scale man-made threats that can be caused by an emergency failure of power electric machines (including powerful electric generators), which are quite often accompanied by the destruction of supporting structures, structural elements of industrial premises and can pose a threat to the life and health of production personnel. But the use of even the most modern systems for monitoring the technical condition does not provide one hundred percent reliability, and when operating electrical machines with a nominal power of the order of units of MW Today, the vast majority of technological processes, both production and agriculture, are based on the use of electrical equipment. A similar situation occurs in the household sector, where we can also note a significant increase in energy consumption in recent decades. Given this, it is obvious the need to ensure the transfer of significant amounts of electricity, which is not possible without the use of transformers and power electric devices, the construction of the lion's share of which provides insulation of live parts and excess heat using transformer oil. Such equipment, in particular, includes: oil transformers, oil and low oil switches, which are characterized by a relatively low cost at sufficiently high rated currents and voltages.

One of the most significant disadvantages of this equipment is the need for constant monitoring of the condition of transformer oil, the physical properties of which largely determine the dielectric strength and overload capacity of the equipment as a whole. The mass fraction of moisture in the latter is one of the key indicators that determine its dielectric and thermally conductive properties. Therefore, the existing technical regulations for the operation of the latter provide for regular laboratory examination of the physical properties of the latter during the technical inspection of equipment, which usually requires quite a lot of time. In turn, this leads to an increase in economic losses associated with increasing the duration of planned maintenance work. Therefore, given the above, it is obvious that the development of new high-precision means of rapid measurement of transformer oil humidity is an urgent task of considerable practical interest.

The article presents a mathematical model of a transformer oil sample, which establishes an unambiguous relationship between its humidity and integral dielectric conductivity in the range of humidity changes from 0% to 0.6%, which corresponds to the allowable moisture content in the latter. It is shown that the obtained functional dependence of the integral dielectric constant on moisture within the investigated range has a monotonically increasing character. Also, the design of a high-frequency humidity sensor based on a band asymmetric wave-water wave was developed, in which the primary measuring conversion of humidity into the amplitude of the output electromagnetic wave is carried out. A mathematical model of such a sensor is developed and the transformation equation is obtained.

To confirm the adequacy of the theoretical conclusions, an experimental study was conducted, based on which it was found that the total relative error does not exceed 2%.

Key words: transformer oil, dielectric constant, humidity, dielectric strength, measurement, sensor.

F. 37. Fig. 8. Ref. 19.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Смчик Віктор Володимирович – директор НДГ «Агрономічне» ННБК «Всеукраїнський науково-навчальний консорціум» (с. Агрономічне, Вінницька область, 23227, Україна, e-mail: agronomichne@ukr.net).

Кожушко Олександр Вікторович – студент 4 курсу групи ЕІ-19-1 (Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com).

Valerii Hraniak – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University. (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Viktor Yemchyk – director of the SRF «Agronomichne» USEC «All Ukrainian Scientific-educational Consortium» (Agronomichne village, Vinnytsia region, 23227, Ukraine, e-mail: agronomichne@ukr.net).

Oleksandr Kozhushko – 4rd year student of EI-19-1 group (Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com).