

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання індивідуального розрахункового завдання

з дисципліни «Методи контролю шкідливих речовин у зразках повітря, ґрунту,
води та продовольчої сировини»

для здобувачів першого рівня вищої освіти

спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» усіх форм
навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 3 від 30 жовтня 2025 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2025

Методичні вказівки до виконання індивідуального розрахункового завдання з дисципліни «Методи контролю шкідливих речовин у зразках повітря, ґрунту, води та продовольчої сировини» для здобувачів першого рівня вищої освіти спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» усіх форм навчання / уклад. В. В. Себко, Т.С. Тихомирова, А.С. Босюк – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – 37 с.

Укладачі: В.В. Себко,
Т.С. Тихомирова
А.С. Босюк

Рецензент І.Л. Красніков

ВСТУП

Метою контрольної роботи є вивчення методики розрахунків електричних параметрів трансформаторного електромагнітного давача (ТЕД), а також визначення температури t електролітичних рідинних середовищ, що контролюються, під час реалізації амплітудного і фазового вихорострумів (електромагнітних) методів вимірювань фізико-хімічних параметрів зразків рідин. Слід визначити, що одним із способів інформативного контролю зразків електролітичних рідин є застосування мініатюрного занурюваного давача, який може занурюватися в достатньо великі ємності, що надає змогу зчитувати вимірювальну інформацію навіть у тому випадку, якщо рідина не є гомогенною. При цьому, унаслідок занурювання отвір ТЕД заповнюється водою, тобто у даному випадку стовп рідини з виробничої ємності, який заповнює радіальний отвір ТЕД є одночасно і осердям і зразком електролітичної рідини, характеристики якого підлягають вимірюванням. В іншому виконанні – ТЕД з металевим осердям, застосовують у однопараметровому варіанті задля вимірювання температури t зразка рідини. В цьому випадку для вимірювання температури рідини, визначають температуру металевого осердя давача, причому досліджувана рідина, яка піддається нагріву передає свою температуру металевому осердю мініатюрного давача.

Дана робота має двадцять два варіанта завдань і розрахована на одну групу аспірантів. Ці варіанти допоможуть аспірантам, користуючись заданими параметрами осердя та геометричними параметрами ТЕД, розв'язати пряму задачу – визначити ЕРС ТЕД та фазові кути зсуву, а також побудувати градувальні залежності ЕРС та фазових кутів зсуву від температури, що, в свою чергу, є кінцевим етапом розв'язку прямої задачі.

Найважливішим значенням розв'язку прямої задачі є знайдені діапазони ЕРС та фазових кутів зсуву, які відповідають межах змінення досліджуваних зразків, що надає можливість підбору вимірювальної апаратури схеми включення ТЕД, а також дозволяє знайти раціональні з точки зору досягнення

малих похибок вимірювань режими роботи ТЕД. Також варіанти даної роботи дозволяють розв'язати обернену задачу, яка полягає у тому, що при відомих значеннях електричних параметрів ТЕД з урахуванням похибок вимірювань вольтметрів і фазометра, знаходять температуру t осердя ТЕД.

Таким чином, знання про сучасні багатопараметрові безконтактні електромагнітні методи та пристрої повинні бути використані під час вимірювального контролю температури охолоджуючих рідин, трансформаторних, конденсаторних, вакуумних та інших мастил, що застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, хімічному машинобудуванні, а також під час практичних занять з дисципліни «Методи контролю шкідливих речовин у зразках повітря, ґрунту, води та продовольчої сировини»

1. ВХІДНІ ДАНІ

Дані до розрахунків вибирають за номером завдання, відповідно до порядкового номеру прізвища здобувача у журналі академічної групи. У таблиці 1 (у відповідних стовпцях) вказано наступні дані (зліва – направо): номер завдання; W_n – число витків намагнічувальної обмотки ТВП; W_2 – число витків вимірювальної обмотки; l_n – довжина намагнічувальної обмотки ТВП (при цьому $l_n = l$, де l довжина зразка, що контролюється); H_0 – напруженість магнітного поля ТВП без виробу; x_1 – узагальнений магнітний параметр, при початковій температурі $t = t_1 = 20$ °С; ρ_1 – питомий електричний опір при $t = t_1 = 20$ °С; α – температурний коефіцієнт опору (ТКО) зразка рідини, або матеріалу осердя мініатюрного занурюваного трансформаторного вихорострумовеого перетворювача (тобто ТВП); a – радіус осердя ТВП; a_n – радіус ТВП; матеріал осердя. Також відома початкова температура $t_1 = 20$ °С, магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м і відносна магнітна проникність зразка або металевого осердя занурюваного ТВП $\mu_r = 1$, радіус скляної трубки $a_{ск.т}=10 \cdot 10^{-3}$ м, радіус рідини $a_p=9 \cdot 10^{-3}$ м, довжина досліджуваного зразка рідини $l_p=0,5$ м.

Таблиця 1 – Вхідні дані: $t_1 = 20$ °С, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\mu_r = 1$,
діапазон температур t [20 ... 70 °С].

Вхідні дані: $t_1=20$ °С, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $a_{ск.т}=10 \cdot 10^{-3}$ м, $a_p=9 \cdot 10^{-3}$ м, $l_p=0,5$ м

Таблиця 1 – Вхідні дані: $t_1 = 20$ °С, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\mu_r = 1$,
діапазон температур t [20 ... 70 °С].

№ прізвища студента в журналі	W_n	W_2	H_0 , А/м	l_n , см	x_1	ρ_1 , Ом·м	$\alpha \cdot 10^{-3}$, 1/°С	a , мм	a_n , мм	Матеріал циліндричного виробу або осердя мініатюрного перетворювача
1	70	170	570	70	2,0	$1,58 \cdot 10^{-7}$	3,5	2	2,5	срібло

Продовження табл.1

2	70	175	710	2	2,33	$1,75 \cdot 10^{-7}$	4,26	1,02	1,05	латунь ЛС – 59
3	120	205	800	2,4	2,65	$1,01 \cdot 10^{-7}$	3,07	1,5	2,2	сплав платини
4	70	200	0,3	690	1,85	$78 \cdot 10^{-8}$	0,79	1,4	1,6	нержавіюча сталь НН-3
5	67	170	2	708	2	$1,7 \cdot 10^{-8}$	4,27	1	1,02	мідь М2
6	300	1050	0,5	600	1,6	$1,25 \cdot 10^{-4}$	0,6	10	10	розчин хлориду калію КСІ
7	350	900	0,5	500	2,9	$3,21 \cdot 10^{-4}$	0,58	10	10	Водний розчин NaOH
8	550	1500	0,5	800	1,9	$2,68 \cdot 10^{-4}$	1,4	10	10	розчин хлориду натрію NaCl
9	1200	400	0,5	900	5,4	$0,0054 \cdot 10^{-4}$	2,1	10	10	15% розчин сірчаної кислоти H ₂ SO ₄
10	1100	350	0,5	1000	5,6	$0,0039 \cdot 10^{-4}$	0,005	10	10	10% розчин сірчаної кислоти H ₂ SO ₄
11	1080	400	0,5	700	6,3	$0,002 \cdot 10^{-4}$	0,62	10	10	Хлороокис селену SeOCl
12	1250	500	0,5	900	2,2	$1,16 \cdot 10^{-4}$	0,1	10	10	Водний розчин KOH
13	800	200	0,5	600	5,5	$0,002 \cdot 10^{-4}$	0,57	10	10	5% розчин H ₂ SO ₄
14	1000	295	0,5	800	3,0	$0,016 \cdot 10^{-4}$	0,55	10	10	розчин хлорсульфонової кислоти SO ₂ OHCl
15	920	400	0,5	600	5,96	$0,0002 \cdot 10^{-4}$	0,2	10	10	Розчин SOCl ₂
16	100	185	2,2	800	2,5	$0,99 \cdot 10^{-8}$	3,00	1,5	1,8	латунь
17	90	120	6,0	500	2,8	$5,5 \cdot 10^{-8}$	4,5	2,9	3,5	вольфрам
18	400	1200	0,5	500	6,00	$2 \cdot 10^{10}$	4,310	10	10	розчин олеїнової кислоти

Кінець табл. 1

19	270	800	0,5	900	2,75	$0,10452 \cdot 10^{-5}$	2,11	10	10	розчин адипінової кислоти
20	72	175	0,21	750	2,8	1,69	4,0	1	1,2	Мідь М2
21	80	200	48	600	1,9	2,7	4,22	2,5	3,0	алюміній
22	300	1000	0,5	700	2,61	$0,811 \cdot 10^{-5}$	1,011	10	10	розчин оцтової кислоти

2. ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Неруйнівний контроль (НК) забезпечує якість, надійність та безпеку експлуатації різноманітних технічних об'єктів, що контролюються [1–4]. Таким чином, *неруйнівний контроль – це контроль, при здійсненні якого не повинна бути порушена придатність об'єкта контролю (ОК) до використання стосовно свого призначення.* НК застосовують також і для захисту споживача від неякісної продукції, як експериментальні методи оцінки якості об'єкта. Важливою складовою систем управління якістю продукції є засоби НК матеріалів, виробів і середовищ, а також технології технічної діагностики стану виробів. Технічна діагностика здійснюється з метою визначення технічного стану об'єкта [1–3]. Таким чином, *технічна діагностика – це галузь знань, яка досліджує технічний стан об'єктів діагностування та виявлення технічних станів, розробляє методи їх визначення, а також принципи побудови та організацію використання систем діагностування. Технічне діагностування – процес визначення технічного стану об'єкта діагностування з певною точністю.* При діагностуванні необхідно розрізняти робочі дії, які виконуються об'єктом при його функціонуванні та тестові дії на об'єкт, які застосовуються тільки для діагностування.

Технічний стан – сукупність властивостей об'єкта, які змінюються в процесі виробництва або експлуатації і характеризуються у певний момент часу ознаками, встановленими технічною документацією на об'єкт [1–3].

Об'єкт випробувань – це продукція, що підлягає випробуванню [1–3].

Ознака продукції – якісна або кількісна характеристика будь-яких властивостей або стану продукції. Ознака, що контролюється – характеристика об'єкта, який підлягає контролю. Обсяг контролю – це кількість об'єктів і сукупність ознак, встановлених для проведення контролю [1–3].

Рівень розвитку промисловості на сучасному етапі характеризується не тільки об'ємом виробництва та асортиментом нової продукції, а й показниками її якості. У рішенні найважливішої проблеми підвищення якості продукції головну роль виконують методи і засоби НК. Згідно з ISO 8402–86 *якість продукції – це сукупність властивостей і характеристик продукції, що надають їй здатності задовольняти встановлені або передбачувані потреби. Характеристика продукції – це об'єктивна її особливість, за якою її відрізняють від інших видів продукції. Якість виготовлення – це сукупність характеристик процесу виготовлення продукції, від яких залежить відповідність цього процесу та його результатів певним вимогам. Показник якості продукції – це кількісна характеристика однієї чи декількох її властивостей, що характеризують її якість у певних умовах створення, використання чи споживання [1–4].* Таким чином, високоякісний об'єкт повинен відрізнятися постійністю хімічного складу, мікро– та макроструктури, електричними і магнітними характеристиками підвищеними фізико-хімічними властивостями. Тому найважливіше значення на сьогодні набувають неруйнівні випробування матеріалів, виробів і середовищ.

Неруйнівні випробування – це випробування з використанням фізичних методів контролю, які не порушують властивостей об'єкта та його придатності до використання за призначенням [5].

Неруйнівні випробування передбачають реєстрацію сигналу, що контролюється, тобто сигналу, що надходить на вхід засобу НК і несе інформацію про технічний стан ОК. У загальному сенсі *метод контролю – це правила застосування певних принципів і засобів контролю [5].*

Засоби контролю – це технічні пристрої, речовини та матеріали для проведення контролю [5]. У даній роботі буде розглянуто пряму і обернену задачі електромагнітного НК при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів. При цьому у оберненій задачі будуть визначені температурні параметри електролітичних рідин та металевого осердя занурюваного електромагнітного перетворювача. Температура – це фізична величина, що визначається як параметр стану термодинамічної рівноваги фізичних систем [5]. У нашому випадку це екстенсивна величина, яка визначається за допомогою непрямих вимірювань, в наслідок перетворювання її в інтенсивну (безпосередньо виміряну) величину, наприклад, в ЕРС або фазу сигналу [7].

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕД ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ АМПЛІТУДНОГО І ФАЗОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ НК

Основою електромагнітних методів контролю параметрів виробів вузлів і конструкцій є ефект впливу вихрових струмів, що збуджуються безпосередньо в ОК, на електричні компоненти сигналів первинних електромагнітних перетворювачів [5, 6]. Як засіб НК, буде використано трансформаторний електромагнітний перетворювач (ТЕД), який містить дві обмотки (намагнічувальну та вимірювальну) і перетворює параметр, що контролюється, в ЕРС та фазу вимірювальної обмотки [5-9].

Таким чином, збуджувальна (намагнічувальна, первинна) обмотка потрібна для створення електромагнітного поля, тобто вихрових струмів в ОК, у цей час вторинна (вимірювальна) обмотка, використовується для реєстрації ЕРС, яку обумовлено проходженням магнітного потоку усередині зразка електролітичної рідини, що контролюється. Оскільки вимірювальна котушка (обмотка) цього електромагнітного перетворювача виконує функції вторинної обмотки трансформатора, він має назву *трансформаторний* [5]. При цьому амплітуда і

фаза ЕРС вторинної обмотки ТЕД залежать від параметрів зразка рідини, або металевого осердя занурюваного перетворювача [5-9].

На рис. 1 надано схему теплового ТЕД за допомогою якої здійснюється безконтактний вимірювальний контроль температури t , під час реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів НК зразка рідини [5-10]. Слід відзначити, що для нагріву ОК у процесі контролю схема містить гріючий пристрій ГП. Схема ТЕД передбачає два ідентичних електромагнітних перетворювача: РП (робочій перетворювач) і ОП (опорний перетворювач). Намагнічувальні обмотки РП і ОП увімкнуті послідовно–узгоджено, а вимірювальні – безпосередньо до приладів схеми [10-13]. Контрольним методом вимірювання Температури є термометри опору платинові ТОП, які закріплено безпосередньо до зразка (скляної трубки в якій розміщується зразок рідини, або металеве осердя ТЕД) [13, 14].

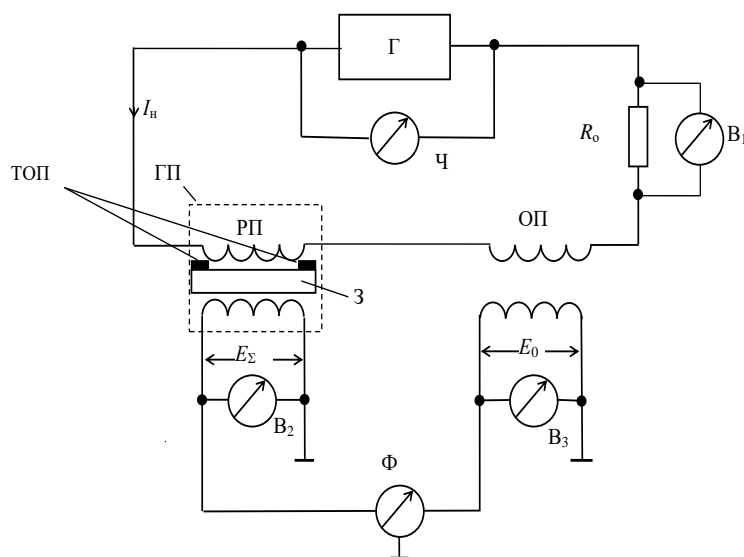


Рисунок 1 – Схема ТЕД для безконтактного вимірювального контролю температури t зразка.

Слід відзначити, що схема на рис. 1 не передбачає компенсацію ефектів повітряного проміжку, при цьому вважають, що вимірювальну обмотку нанесено безпосередньо на зразок, що контролюється [10]. Схема також містить

генератор Γ , частотомір \mathcal{C} , вольтметри V_1 , V_2 і V_3 , зразковий опір R_0 , досліджуваний циліндричний зразок Z , фазометр Φ . Вольтметр V_1 призначено для визначення намагнічувального струму I_H (відповідно до закону Ома). Під час роботи схеми за допомогою вольтметра V_2 вимірюємо ЕРС E_Σ при наявності зразка в РП, потім за допомогою вольтметра V_3 вимірюємо ЕРС E_0 (без виробу). Фазовий кут зсуву φ_0 (поміж ЕРС E_0 та E_Σ) визначаємо за допомогою фазометра Φ [9-14]. Таким чином, досліджується математична модель системи ТЕД – ЗРАЗОК (параметри якої – питомий електричний опір ρ і температура t зразка, а також геометричні параметри ТЕД і геометричні параметри зразка, які у даному випадку є заданими) [10-14].

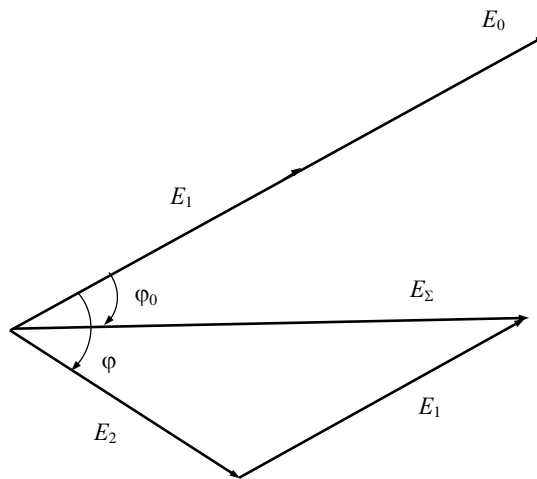


Рисунок 2 – Векторна діаграма ЕРС і фазових кутів ТЕД зі зразком, що контролюється.

На рис. 2 подано векторну діаграму ЕРС і фазових кутів зсуву ТЕД, де E_0 – ЕРС вимірювальної обмотки ТЕД у відсутності зразка; E_1 – ЕРС, що обумовлена проходженням магнітного потоку у повітряному проміжку між зразком та вимірювальною обмоткою; E_2 – ЕРС, що обумовлена проходженням магнітного потоку усередині досліджуваного зразка; φ_0 – фазовий кут зсуву між ЕРС E_0 та ЕРС E_Σ ; φ – фазовий кут зсуву між ЕРС E_0 та ЕРС E_2 [8-11].

Таким чином, проектування електромагнітних перетворювачів та добір вимірювальних приладів необхідної точності та чутливості, спонукає до

розв'язку прямої задачі [8-12]. Пряма задача полягає у наступному: при відомих геометричних параметрах перетворювача та зразка, використовуючи залежність ρ від t , знаючі температурний коефіцієнт опору (ТКО) α , визначають електричні параметри ТЕД: ЕРС E_{Σ} , E_2 та фазові кути зсуву φ і φ_0 . Слід відзначити, що побудова градувальних залежностей є кінцевим етапом розрахунку електричних параметрів ТЕД, тобто $E_{\Sigma} = f(t)$, $E_2 = f(t)$ для амплітудного електромагнітного методу та $\varphi = f(t)$ і $\varphi_0 = f(t)$ – для фазового електромагнітного методу [8-12].

Нижче наведено алгоритм розрахунку електричних параметрів ТЕД.

1. Робочу точку слід вибирати з міркувань найбільшої чутливості ТЕД до параметрів зразка, тобто на залежностях $k_t = f(x_t)$ і $\varphi_t = f(x_t)$ (таблиця А.1 додаток А), а саме на фрагментах цих залежностей у діапазоні $0,6 \leq x \leq 5,0$ (де крутизна універсальних функцій перетворення є найбільшою). При цьому k_t – це питомий нормований магнітний потік усередині виробу або питома нормована ЕРС [5].

$$k_t = \frac{E_{2t}}{E_0 \eta \mu_r}, \quad (1)$$

де індекс t свідчить про те, що досліджуваний параметр є залежним від температури; μ_r – відносна магнітна проникність, для немагнітних виробів $\mu_r = 1$; η – коефіцієнт заповнення ТЕД виробом, $\eta = a^2/a_{\Pi}^2$ (a і a_{Π} , радіуси виробу і ТЕД відповідно). Фізична сутність узагальненого параметра x – це відношення радіусу виробу до класичної глибини проникнення магнітного поля у виріб, що контролюється [5]:

$$x_t = \frac{a\sqrt{2}}{\delta}. \quad (2)$$

Класична глибина проникнення магнітного поля у виріб δ – це відстань від поверхні виробу до шару, в якому густина вихрових струмів в « e » раз нижча, ніж на поверхні ($e = 2,7183$ – основа натурального логарифму) [5].

2. Зробимо розрахунок частоти намагнічувального струму ТЕД f_1 , яка відповідає початковій температурі t_1 , за формулою [5-9]

$$f_1 = \frac{x_1^2 \rho_1}{2\pi a^2 \mu_0}. \quad (3)$$

3. Визначимо ЕРС E_0 , користуючись формулою

$$E_0 = 4,44 f_1 W_2 \pi a_{\Pi}^2 \mu_0 H_0. \quad (4)$$

4. Формула для визначення ефективного значення струму I_H має наступний вигляд:

$$I_H = \frac{H_0 l_{\Pi}}{\sqrt{2} W_1}. \quad (5)$$

5. Задаючись дискретними значеннями температур у діапазоні від 20 до 60 °С, через кожні 5°С, визначаємо питомий електричний опір ρ_t для кожного дискретного значення температури, за формулою [7]:

$$\rho_t = \rho_1 + \frac{\rho_1 \alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1). \quad (6)$$

6. Знаючи питомий електричний опір ρ_t , знаходимо узагальнений магнітний параметр x_t для кожної досліджуваної температурної точки:

$$x_t = a \sqrt{\frac{2\pi \mu_0 f_1}{\rho_t}}. \quad (7)$$

7. Для визначення параметрів k_t і φ_t необхідно скористатися залежностями $k_t = f(x_t)$ і $\varphi_t = f(x_t)$ з таблиці А.1 (додаток А). Слід визначити, що при потраплянні k_t і φ_t між двома близькими значеннями, необхідно здійснювати лінійну інтерполяцію за формулами:

$$k_t = \frac{(x_k - x_t)}{(x_k - x_{\Pi})} (k_{\Pi} - k_k) + k_k, \quad (8)$$

де x_t – значення узагальненого параметру, яке розраховано за формулою (7); x_k – кінцеве значення з двох близьких значень, між яких знаходиться x_t ; x_{Π} – попереднє значення з двох близьких значень, між яких знаходиться x_t ; k_{Π} –

значення параметру k_t , яке відповідає x_{Π} ; k_k – значення параметру k_t , яке відповідає x_k

$$\varphi_t = \frac{(x_t - x_{\Pi})}{(x_k - x_{\Pi})}(\varphi_k - \varphi_{\Pi}) + \varphi_{\Pi}, \quad (9)$$

де φ_k – значення параметру φ_t , яке є відповідним x_k ; φ_{Π} – значення параметру φ_t , яке є відповідним x_{Π} .

8. Розрахуємо коефіцієнт заповнення ТЕД виробом, що контролюється [5-9]:

$$\eta = \frac{a^2}{a_{\Pi}^2}. \quad (10)$$

9. Визначимо ЕРС E_2 , за формулою

$$E_2 = k_t E_0 \eta. \quad (11)$$

10. Далі визначимо ЕРС E_1

$$E_1 = E_0 (1 - \eta). \quad (12)$$

11. Знаходимо ЕРС $E_{\Sigma t}$ за допомогою векторної діаграми (рис. 2) та користуючись теоремою косинусів, звідки маємо:

$$E_{\Sigma t} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \varphi}. \quad (13)$$

12. Знаходимо значення фазового кута зсуву φ_0 , за формулами [9, 10]

$$|\operatorname{tg} \varphi_0| = \frac{E_2 \sin \varphi}{E_2 \cos \varphi + E_1}, \quad (14)$$

$$|\varphi_0| = \operatorname{arctg} \frac{E_2 \sin \varphi}{E_2 \cos \varphi + E_1}. \quad (15)$$

Таким чином, наведений алгоритм розрахунку електричних параметрів ТЕД, виконується для дискретних значень температур у діапазоні від 20 до 60 °С, через кожні 5 °С. Результати розрахунків зведемо у таблицю 2.

13. Далі необхідно побудувати градувальні залежності: $E_{\Sigma} = f(t)$, $E_2 = f(t)$ – амплітудний метод і $\varphi_0 = f(t)$, $\varphi = f(t)$ – фазовий метод.

Таблиця 2 – Розрахунок електричних параметрів ТЕД (пряма задача)

$$\mu_r = 1; \quad f_1 = \quad [\text{Гц}]; \quad \eta = \quad ; \quad I_H = \quad [\text{А}]$$

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho_t \cdot 10^{-8}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	x_t	k_t	$\varphi_t, \text{ град}$	$E_2, \text{ В}$	$E_{\Sigma t}, \text{ В}$	$\varphi_0, \text{ град}$
20							
25							
30							
35							
40							
45							
50							
55							
60							

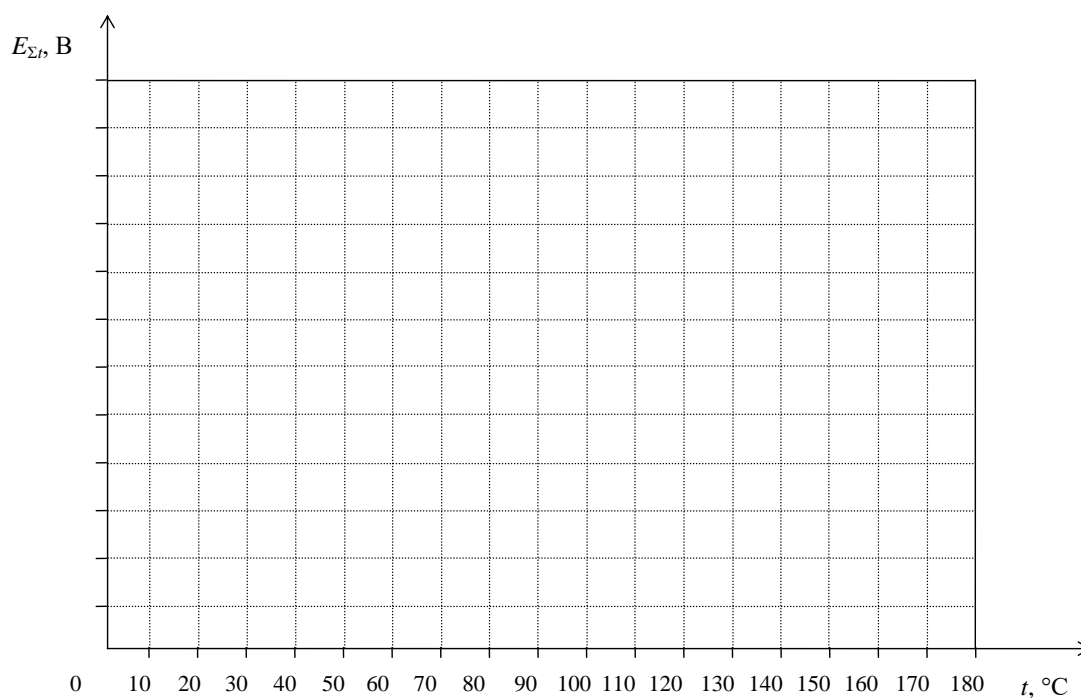


Рисунок 3 – Градувальна залежність $E_{\Sigma t} = f(t)$.

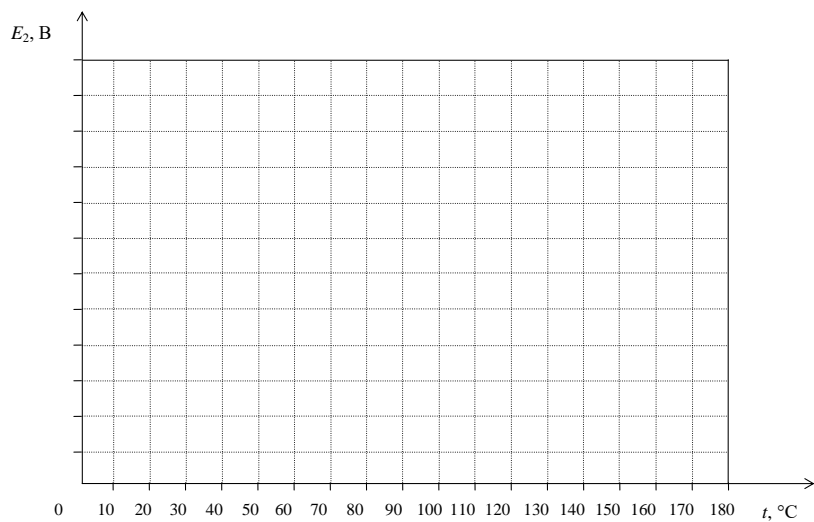


Рисунок 4 – Градувальна залежність $E_2 = f(t)$.

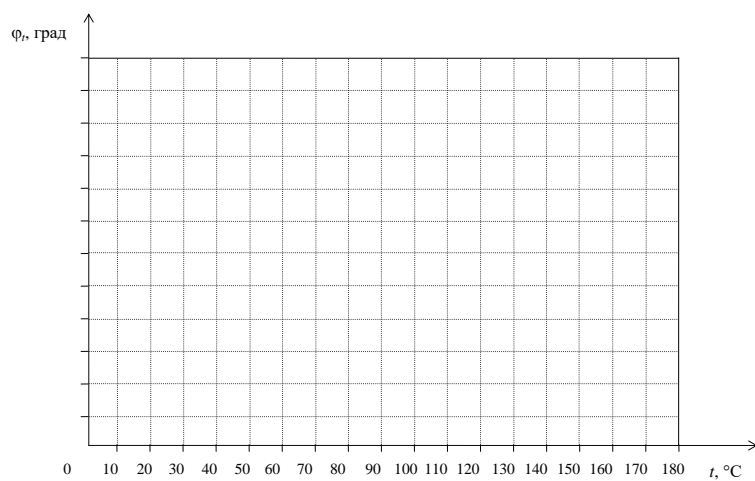


Рисунок 5 – Градувальна залежність $\varphi_t = f(t)$.

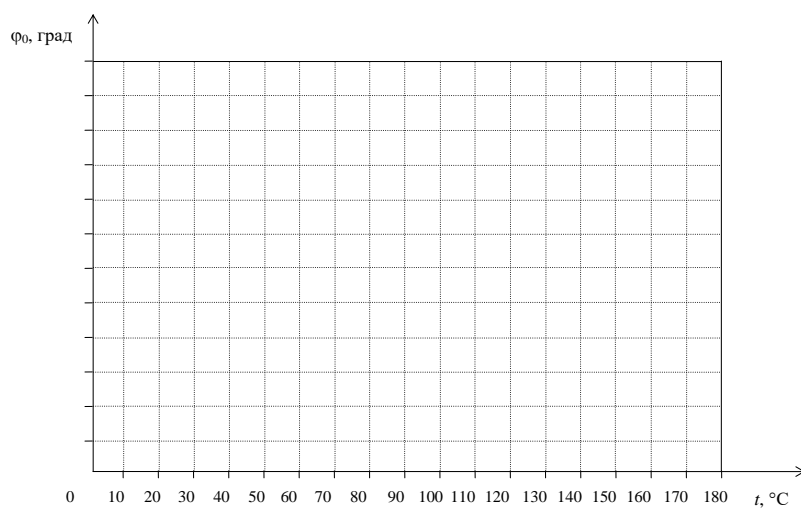


Рисунок 6 – Градувальна залежність $\varphi_0 = f(t)$.

4. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕМАГНІТНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ (ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА)

Виконаємо обернену задачу, яка полягає у визначенні температури t електролітичних рідин або осердя ТЕД при відомих електричних параметрах E_{Σ} , E_0 , E_2 , φ і φ_0 (які було знайдено у прямій задачі).

Вважаємо, що вольтметри V_2 і V_3 (див. рис. 1) є вольтметрами у яких межі вимірювань $E_{\text{мв}} = [50 \text{ мВ} \div 1000 \text{ В}]$. При цьому відносна похибка вимірювань вольтметрів V_2 та V_3 , визначається за формулою [9-11]

$$\gamma_E = \pm \left(0,001 + \frac{0,002E_{\text{пр}}}{E} \right). \quad (16)$$

Також вважаємо, що у схемі на рис. 1 використовується фазометр Φ (границі вимірювань фазових кутів зсуву $\varphi = [0 \div 360 \text{ град}]$, розрядність два знаки після коми).

Абсолютна похибка вимірювань фазометра визначається за формулою

$$\Delta\varphi = \pm \left(0,1 + \frac{10^{-7}}{f_1} \right), \quad (17)$$

формула для визначення відносної похибки вимірювань має такий вигляд

$$\gamma_{\varphi} = \pm \left(\frac{0,1 + 10^{-7}/f_1}{\varphi} \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

де f_1 значення частоти при $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Введемо апаратурні похибки вимірювань вольтметрів та фазометра у знайдені електричні параметри ТЕД, вважаючи величини ЕРС та фазових кутів зсуву умовно–вимірними.

Розглянемо спочатку амплітудний електромагнітний метод контролю електричних і температурних параметрів з урахуванням апаратурних похибок вимірювань вольтметрів та фазометра.

1. Відносна похибка вимірювань сумарної ЕРС $E_{\Sigma t}$, визначається за формулою

$$\gamma_{E_{\Sigma t}} = \pm \left(0,001 + \frac{0,002E_{к.з}}{E_{\Sigma t}} \right), \quad (19)$$

де $E_{к.з}$ – кінцеве значення шкали, $E_{к.з} = 50 \cdot 10^{-3}$ [В].

2. Далі знаходимо відносну похибку вимірювань ЕРС E_0 (ЕРС ТЕД без виробу):

$$\gamma_{E_0} = \pm \left(0,001 + \frac{0,002E_{к.з}}{E_0} \right). \quad (20)$$

3. З урахуванням (19), визначимо умовно–вимірне значення ЕРС $E_{\Sigma ув}$

$$E_{\Sigma ув} = E_{\Sigma t} \pm \gamma_{E_{\Sigma t}} E_{\Sigma t}. \quad (21)$$

4. Аналогічним чином розраховуємо ЕРС $E_{0ув}$, при цьому

$$E_{0ув} = E_0 \pm \gamma_{E_0} E_0. \quad (22)$$

5. Знаючи ЕРС $E_{0ув}$, визначимо ЕРС $E_{1ув}$ за формулою [9-11]

$$E_{1ув} = E_{0ув} (1 - \eta). \quad (23)$$

6. З урахуванням (17) знаходимо умовно–вимірне значення фазового кута зсуву між ЕРС E_0 та $E_{\Sigma t}$, за формулою [9-11]

$$\varphi_{0ув} = \varphi_0 + (0,1 + (10^{-7} / f_1)). \quad (24)$$

7. Визначимо модуль ЕРС $E_{2ув}$ [9-12]

$$|E_{2ув}| = \sqrt{E_{\Sigma ув}^2 + E_{1ув}^2 + 2E_{1ув}E_{\Sigma ув} \cos \varphi_{0ув}}. \quad (25)$$

8. Знаходимо параметр $k_{ув}$, знаючи ЕРС $E_{2ув}$, $E_{0ув}$ і коефіцієнт заповнення η

$$k_{ув} = \frac{E_{2ув}}{E_{0ув}\eta}. \quad (26)$$

9. Для визначення параметра $x_{губ}(k)$ необхідно скористатися табличними залежностями $k_t = f(x_t)$ (див. додаток А). При цьому $x_{губ}(k)$ знаходимо для дискретних значень температур в діапазоні від 20 до 70 °С, через кожні 5 °С. При попаданні $x_{губ}$ між двома близькими значеннями, необхідно використовувати лінійну інтерполяцію:

$$x_{t_{yB}} = x_k - (k_{yB} - k_k) \frac{x_k - x_{II}}{k_{II} - k_k}. \quad (27)$$

10. Питомий електричний опір $\rho_{t_{yB}}$, визначимо за формулою

$$\rho_{t_{yB}} = \frac{a^2 \mu_0 2\pi f_1}{x_{t_{yB}}^2}. \quad (28)$$

11. Зрівнявши вирази (6) та (28), отримаємо формулу для визначення Температури немагнітного виробу при реалізації амплітудного електромагнітного методу НК [13, 14]

$$t_{yB} = \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) \left(\frac{\rho_{t_{yB}}}{\rho_1} - 1 \right) + t_1. \quad (29)$$

Подамо алгоритм визначення $\rho_{t_{yB}}$ і t_{yB} у вигляді

$$E_{\Sigma yB}, E_{0yB} \rightarrow E_{1yB} \rightarrow \varphi_{0yB} \rightarrow E_{2yB} \rightarrow k_{yB} \rightarrow x_{t_{yB}} \rightarrow \rho_{t_{yB}} \rightarrow t_{yB}.$$

12. Визначимо похибки вимірювань $\gamma_{\rho_{t_{yB}}}$ і $\gamma_{t_{yB}}$ при реалізації амплітудного електромагнітного методу за формулами [1-4]

$$\gamma_{\rho_{t_{yB}}} = \frac{\rho_{t_{yB}} - \rho'}{\rho'} 100\%, \quad (30)$$

$$\gamma_{t_{yB}} = \frac{t_{yB} - t'}{t'} 100\%. \quad (31)$$

Розв'яжемо оберенену задачу для фазового електромагнітного методу, яка полягає у тому, що, знаючи φ_{0yB} , задані геометричні параметри ТЕД та виробу, ТКО α матеріалу виробу і залежність ρ від t , визначають питомий електричний опір $\rho_{t_{yB}}$ і температуру t_{yB} . Нижче наведено алгоритм розв'язку оберненої задачі при реалізації фазового електромагнітного методу.

13. Знаючи умовно–вимірянні значення величин φ_{0yB} , $E_{\Sigma yB}$ і E_{1yB} , визначимо фазовий кут зсуву φ_{yB} за формулою [9, 10]

$$\left| \operatorname{tg} \varphi_{yB} \right| = \frac{E_{\Sigma yB} \sin \varphi_{0yB}}{E_{\Sigma yB} \cos \varphi_{0yB} - E_{1yB}}, \quad (32)$$

звідки знаходимо $\varphi_{yB} =$.

14. Далі, використовуючи залежності $\varphi_t = f(x_t)$ (див. додаток А), знаходимо $x_{t_{yB}}(\varphi)$, при необхідності скориставшись формулою для інтерполяції, яка має вигляд

$$x_{t_{yB}} = \frac{(\varphi_{yB} - \varphi_k)(x_{\Pi} - x_k)}{(\varphi_{\Pi} - \varphi_k)} + x_k. \quad (33)$$

15. Питомий електричний опір $\rho_{t_{yB}}$ визначаємо за формулою (28).

16. Формула для визначення температури зразка, при реалізації фазового електромагнітного методу, має наступний вигляд [13, 14]

$$t_{yB} = \left(\frac{x_1^2}{x_{t_{yB}}^2(\varphi)} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1. \quad (34)$$

Таким чином, алгоритм визначення параметрів $\rho_{t_{yB}}$ і t_{yB} , наступний

$$\varphi_{0yB} \rightarrow \operatorname{tg}\varphi_{yB} \rightarrow x_{t_{yB}} \rightarrow \rho_{t_{yB}} \rightarrow t_{yB}.$$

Результати розрахунків $\rho_{t_{yB}}$ та t_{yB} при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів зведемо до таблиць 3 і 4 відповідно.

17. Розрахуємо похибки вимірювань $\gamma_{\rho_{t_{yB}}}$ і $\gamma_{t_{yB}}$ при реалізації фазового електромагнітного методу за формулами [1-4]:

$$\gamma_{\rho_{t_{yB}}} = \frac{\rho_{t_{yB}} - \rho'}{\rho'} 100\%, \quad (35)$$

$$\gamma_{t_{yB}} = \frac{t_{yB} - t'}{t'} 100\%. \quad (36)$$

Результати розрахунків $\rho_{t_{yB}}$ і t_{yB} та $\gamma_{\rho_{t_{yB}}}$ і $\gamma_{t_{yB}}$ при реалізації амплітудного і фазового методів зведемо у таблиці 3 і 4 відповідно.

5. ЧИСЕЛЬНИЙ ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕД (ПРЯМА ЗАДАЧА) ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ТОЧКИ

$$t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Варіант 2

1. Використовуючи таблицю вхідних даних (див. таблицю 1), вибираємо робочу точку:

$$x = x_1 = 2,33.$$

2. Розрахуємо частоту f_1 (при $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), за формулою (3)

$$f_1 = \frac{x_1^2 \rho_1}{2\pi a^2 \mu_0} = \frac{2,33^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} (1,02 \cdot 10^{-3})^2} = 11585 \text{ [Гц]}.$$

3. Визначимо ЕРС E_0 (ТЕД без виробу) за формулою (4)

$$\begin{aligned} E_0 &= 4,44 f_1 W_2 \pi a_{\Pi}^2 \mu_0 H_0 = \\ &= 4,44 \cdot 11586 \cdot 175 \cdot 3,14 (1,04 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 707 = 27,1494 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}. \end{aligned}$$

4. Розрахуємо чисельне значення намагнічувального струму I_{Π}

$$I_{\Pi} = \frac{H_0 l_{\Pi}}{\sqrt{2} W_1} = \frac{707 \cdot 0,02}{1,4142 \cdot 70} = 142,84 \cdot 10^{-3} \text{ [А]}.$$

5. Задаючись дискретними значеннями Температур в діапазоні від 20 до 70 $^{\circ}\text{C}$ (через кожні 5 $^{\circ}\text{C}$), знаходимо питомий електричний опір ρ_t , наприклад, для $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, маємо:

$$\begin{aligned} \rho_{70^{\circ}\text{C}} &= \rho_1 + \frac{\rho_1 \alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1) = 1,75 \cdot 10^{-8} + \frac{1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 4,26 \cdot 10^{-3}}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20} (70 - 20) = \\ &= 2,093 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

6. Знаючи $\rho_{70^{\circ}\text{C}}$, знаходимо узагальнений параметр $x_{70^{\circ}\text{C}}$:

$$x_{70^{\circ}\text{C}} = a \sqrt{\frac{2\pi\mu_0 f_1}{\rho_{70^{\circ}\text{C}}}} = 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 11,586 \cdot 10^3}{2,093 \cdot 10^{-8}}} = 2,1314.$$

7. Визначимо питому нормовану ЕРС k_t та фазовий кут зсуву φ_t , використовуючи табличні залежності $k_t = f(x_t)$ і $\varphi_t = f(x_t)$, а також лінійну інтерполяцію (вирази (8) і (9)):

$$k_t = \frac{(x_k - x_t)}{(x_k - x_{\Pi})} (k_{\Pi} - k_k) + k_k =$$

$$= \frac{(2,2 - 2,1314)}{(2,2 - 2,1)} (0,824074 - 0,800221) + 0,800221 = 0,816616 .$$

$$\varphi_t = \frac{(x_t - x_{\Pi})}{(x_k - x_{\Pi})} (\varphi_k - \varphi_{\Pi}) + \varphi_{\Pi} = \frac{(2,1314 - 2,1)}{(2,2 - 2,1)} (27,221 - 25,666) + 25,666 = 26,1543.$$

8. Розрахуємо коефіцієнт заповнення η , за формулою (10)

$$\eta = \frac{a^2}{a_{\Pi}^2} = \frac{1,02^2}{1,04^2} = 0,962 .$$

9. Визначимо ЕРС E_2 :

$$E_2 = k_t E_0 \eta = 0,816616 \cdot 27,1494 \cdot 10^{-3} \cdot 0,962 = 21,3282 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}.$$

10. Розрахуємо ЕРС E_1 , за формулою (12)

$$E_1 = E_0 (1 - \eta) = 27,1494 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,962) = 1,03168 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}.$$

11. Знаходимо ЕРС $E_{\Sigma t}$, за формулою (13):

$$E_{\Sigma t} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1 E_2 \cos \varphi} =$$

$$= \sqrt{(1,03168 \cdot 10^{-3})^2 + (21,3282 \cdot 10^{-3})^2 - 2 \cdot 1,03168 \cdot 10^{-3} \cdot 21,3282 \cdot 10^{-3} \cos 26,1543} =$$

$$= 20,4072 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}.$$

За формулами (14) і (15) визначимо чисельне значення фазового кута зсуву φ_0 :

$$|\operatorname{tg} \varphi_0| = \frac{E_2 \sin \varphi}{E_2 \cos \varphi + E_1} = \frac{21,3282 \cdot 10^{-3} \sin 26,1543}{21,3282 \cdot 10^{-3} \cos 26,1543 + 1,03168 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 0,4659 ,$$

звідки $\varphi_0 = 24,9808$.

12. За результатами розрахунків електричних параметрів ТЕД в діапазоні Температур від 20 до 60°C, побудуємо градувальні залежності $E_{\Sigma t} = f(t)$, $E_2 = f(t)$, $\varphi_t = f(t)$ і $\varphi_0 = f(t)$.

6. ЧИСЕЛЬНИЙ ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕМАГНІТНИХ ВИРОБІВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ АМПЛІТУДНОГО І ФАЗОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ (ОБЕРНЕНА ЗАДАЧА), $t = 70\text{ }^\circ\text{C}$

1. Вважаючи, що похибки вимірювань з однаковими знаками, визначимо відносну похибку вимірювань сумарної ЕРС ТЕД $E_{\Sigma t}$ за формулою (19):

$$\gamma_{E_{\Sigma t}} = \left(0,001 + \frac{0,002 E_{\text{к.з.}}}{E_{\Sigma}} \right) = \left(0,001 + \frac{0,002 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{20,4072 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,005900231$$

2. Розрахуємо відносну похибку вимірювань γ_{E_0} , за формулою (20):

$$\gamma_{E_0} = \left(0,001 + \frac{0,002 E_{\text{к.з.}}}{E_0} \right) = \left(0,001 + \frac{0,002 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{27,1494 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,004683322 .$$

3. З урахуванням чисельного значення $\gamma_{E_{\Sigma t}}$ знаходимо умовно–вимірну ЕРС $E_{\Sigma \text{ув}}$ за формулою (21):

$$\begin{aligned} E_{\Sigma \text{ув}} &= E_{\Sigma t} + \gamma_{E_{\Sigma t}} E_{\Sigma t} = 20,4072 \cdot 10^{-3} + 0,005900231 \cdot 20,4072 \cdot 10^{-3} = \\ &= 20,52760719 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}. \end{aligned}$$

Визначимо наближене значення величини $E_{\Sigma \text{ув}}$, округлюючи десятковий дріб до четвертого розряду (при цьому відкидаємо усі його десяткові знаки після четвертого розряду, і якщо перша цифра, що відкидається, більша за цифру «5» або дорівнює «5», то останню залишену цифру збільшуємо на одиницю) [4].

$$E_{\Sigma \text{ув}} \approx E_{\Sigma \text{нуб}} = 20,5276 \cdot 10^{-3} \text{ [В]},$$

де $E_{\Sigma \text{нуб}}$ – наближене значення величини $E_{\Sigma \text{ув}}$.

4. Знайдемо наближене значення ЕРС $E_{0 \text{ув}}$:

$$\begin{aligned} E_{0 \text{ув}} &= E_0 + \gamma_{E_0} E_0 = 27,1494 \cdot 10^{-3} + 0,004683322 \cdot 27,1494 \cdot 10^{-3} = \\ &= 27,27654938 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}. \end{aligned}$$

$$E_{0 \text{ув}} \approx E_{0 \text{нуб}} = 27,2765 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}.$$

5. Визначимо ЕРС $E_{1 \text{нуб}}$ з урахуванням формули (23):

$$E_{1\text{нуб}} = E_{0\text{нуб}} (1 - \eta) = 27,2765 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,962) = 1,0365 \text{ [В]}.$$

6. За формулою (24) знайдемо умовно-вимірне значення фазового кута зсуву $\varphi_{0\text{уб}}$

$$\varphi_{0\text{уб}} = \varphi_0 + (0,1 + (10^{-7} / f_1)) = 24,9808 + (0,1 + (10^{-7} / 11585)) = 25,08 \text{ [град]}.$$

Визначимо наближене значення величин $\varphi_{0\text{уб}}$, округлюючи десятковий дріб до другого розряду після коми:

$$\varphi_{0\text{уб}} \approx \varphi_{0\text{нуб}} = 25,08.$$

7. Знаходимо модуль ЕРС $E_{2\text{уб}}$ з урахуванням формули (25)

$$\begin{aligned} |E_{2\text{уб}}| &= \sqrt{E_{\Sigma\text{нуб}}^2 + E_{1\text{нуб}}^2 + 2E_{1\text{нуб}}E_{\Sigma\text{нуб}} \cos \varphi_{0\text{нуб}}} = \\ &= \sqrt{(20,5276 \cdot 10^{-3})^2 + (1,0365 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot 20,5276 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0365 \cdot 10^{-3} \cos 25,08} = \\ &= 21,4709 \cdot 10^{-3} \text{ [В]}. \end{aligned}$$

Таким чином, ми отримали наближені умовно-вимірні значення ЕРС $E_{\Sigma\text{нуб}}$, $E_{0\text{нуб}}$, $E_{1\text{нуб}}$ та фазового кута зсуву $\varphi_{0\text{нуб}}$. Ці значення умовно відповідають вимірним значенням указаних величин вольтметрами та фазометром.

8. Визначимо питому нормовану ЕРС $k_{\text{уб}}$:

$$k_{\text{уб}} = \frac{E_{2\text{уб}}}{E_{0\text{уб}} \eta} = \frac{21,4709}{27,2765 \cdot 0,962} = 0,81825.$$

9. Скориставшись табличними залежностями $k_t = f(x_t)$ (див. додаток А), а також формулою (27), визначимо $x_{t\text{уб}}$:

$$\begin{aligned} x_{t\text{уб}} &= x_k - (k_{\text{уб}} - k_k) \frac{x_k - x_{\Pi}}{k_{\Pi} - k_k} = 2,2 - (0,81825 - 0,800221) \times \\ &\quad \times \frac{(2,2 - 2,1)}{(0,824074 - 0,800221)} = 2,124. \end{aligned}$$

10. Визначимо питомий електричний опір $\rho_{70^\circ\text{C}}$, при реалізації амплітудного електромагнітного методу

$$\begin{aligned} \rho_{70^\circ\text{C}} &= \frac{a^2 \mu_0 f_1 2\pi}{x_{\text{уб}}^2} = \frac{(1,02 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 11,586 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 3,14}{2,124^2} = \\ &= 2,108 \cdot 10^{-8} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}. \end{aligned}$$

11. Розрахуємо температуру зразка, що контролюється

$$t_{yB} = \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) \left(\frac{\rho_{t_{yB}}}{\rho_1} - 1 \right) + t_1 = \left(\frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{4,26 \cdot 10^{-3}} \right) \left(\frac{2,108 \cdot 10^{-8}}{1,750 \cdot 10^{-8}} - 1 \right) + 20 = 72,11 \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

12. Розрахуємо відносні похибки вимірювань питомого електричного опору і температури при реалізації амплітудного електромагнітного методу, за формулами (30) і (31):

$$\gamma_{\rho_{70^\circ\text{C}}} = \frac{\rho_{t_{yB}} - \rho'}{\rho'} \cdot 100\% = \frac{2,107 \cdot 10^{-8} - 2,093 \cdot 10^{-8}}{2,093 \cdot 10^{-8}} \cdot 100\% = 0,67\% ,$$

$$\gamma_{t_{yB}} = \frac{t_{yB} - t'}{t'} \cdot 100\% = \frac{72,11 - 70,00}{70,00} \cdot 100\% = 3,01\% .$$

13. При реалізації фазового електромагнітного методу, з урахуванням формули (32), маємо:

$$\begin{aligned} |\operatorname{tg} \varphi_{yB}| &= \frac{E_{\Sigma \text{нуб}} \sin \varphi_{0 \text{нуб}}}{E_{\Sigma \text{нуб}} \cos \varphi_{0 \text{нуб}} - E_{1 \text{нуб}}} = \\ &= \frac{20,4072 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 25,08}{20,4072 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 25,08 - 1,0365 \cdot 10^{-3}} = 0,4957. \end{aligned}$$

Звідки

$$\varphi_{yB} = 26,368 \text{ [град]}.$$

14. Визначимо $x_{t_{yB}}$ (див. додаток А, таблиця А.1), за формулою (33):

$$x_{t_{yB}} = \frac{(\varphi_{yB} - \varphi_k)(x_{\Pi} - x_k)}{(\varphi_{\Pi} - \varphi_k)} + x_k = \frac{(26,368 - 27,221)(2,1 - 2,2)}{(25,666 - 27,221)} + 2,2 = 2,145 .$$

15. Знаючи $x_{t_{yB}}$, розрахуємо питомий електричний опір $\rho_{70^\circ\text{C}}$

$$\begin{aligned} \rho_{70^\circ\text{C}} &= \frac{a^2 \mu_0 f_1^2 2\pi}{x_{t_{yB}}^2} = \frac{(1,04 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 11,586 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 3,14}{2,145^2} = \\ &= 2,148 \cdot 10^{-8} \text{ [Ом}\cdot\text{м]} . \end{aligned}$$

16. Знаходимо температуру t_{yB} , при реалізації фазового електромагнітного методу:

$$t_{yB} = \left(\frac{x_1^2}{x_{t_{yB}}^2(\varphi)} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1 = \left(\frac{2,33^2}{2,145^2} - 1 \right) \left(\frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{4,26 \cdot 10^{-3}} \right) + 20 = 65,84 \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

17. Визначимо похибки вимірювань $\gamma_{\rho_{70^\circ\text{C}}}$ і $\gamma_{t_{yB}}$ за формулами (35) і (36):

$$\gamma_{\rho_{70^\circ\text{C}}} = \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \cdot 100\% = \frac{2,148 \cdot 10^{-8} - 2,093 \cdot 10^{-8}}{2,093 \cdot 10^{-8}} \cdot 100\% = 2,63 \text{ [\%]},$$

$$\gamma_{t_{yB}} = \frac{t - t'}{t'} \cdot 100\% = \frac{65,84 - 70,00}{70,00} \cdot 100\% = 5,94 \text{ [\%]}.$$

Результати розрахунків $\rho_{t_{yB}}$ і t_{yB} та $\gamma_{\rho_{t_{yB}}}$ і $\gamma_{t_{yB}}$ при реалізації амплітудного і фазового методів зведемо у таблиці 3 і 4.

Контрольні питання

1. Яким чином здійснюється вибір робочої точки на функціях перетворювання ТЕД $k_t = f(x_t)$ та $\varphi_t = f(x_t)$?
2. Фізична сутність параметрів k і φ ? Навести співвідношення.
3. Закінчить речення: проміжок вихорострумowego перетворювача – це відстань між ...
4. Закінчить речення: трансформаторний вихорострумовой перетворювач – це вихорострумовой перетворювач, який вміщує не менше двох індуктивно зв'язаних обмоток (збуджувальну і вимірювальну) і перетворює параметр контролю ...
5. Закінчить речення: якість продукції – це сукупність властивостей і характеристик ...
6. Закінчить речення: контроль якості продукції – це контроль кількісних або якісних ...
7. Струм збудження вихорострумowego перетворювача (намагнічувальний струм) – це ...
8. На яких фізичних явищах засновано електромагнітні методи (НК)?
9. З якою метою здійснюється технічна діагностика?
10. Об'єктом технічного діагностування є?
11. Закінчить речення: вимірювальна обмотка вихорострумowego перетворювача – це обмотка перетворювача, призначена для перетворення електромагнітного поля вихрових струмів у ...
12. Дайте визначення терміну «метод контролю»?
13. Основні переваги вихорострумowych (електромагнітних) методів неруйнівного контролю рідинних середовищ?
14. Принцип дії трансформаторного електромагнітного давача (ТЕД) при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів.
15. Навести порядок розрахунків під час розв'язку прямої та оберненої задач.

16. Які сигнали ТВД при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів є інформативними?

17. Яку математичну модель було досліджено під час розрахунків?

18. У чому полягає робота схеми для контролю електричних та температурних параметрів зразків електролітичних рідин?

19. Закінчить речення: обмотка збудження вихорострумowego перетворювача (намагнічувальна обмотка) – це обмотка перетворювача, призначена для ...

20. Узагальнений параметр вихорострумowego контролю – це ...

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища : підруч. / Г. І. Гринь, В. І. Мохонько, О. В. Суворін та ін. – Сєверодонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 420 с.
2. Кватернюк С.М., Петрук В.Г. Мультиспектральний екологічний контроль інтегральних параметрів забруднення водних об'єктів. *Екологічні науки*. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, 2018, №2 (21). С. 133- 137.
3. Кучерук В. Ю., Кулаков П. І., Мостовий Д. В. Засіб вимірювання питомої електропровідності молока у молокоприймальній камері Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 1 С.7-14.
4. Метрологія [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / уклад.: Н.М. Защепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.
5. Середюк О.Є., Барна О.Б., Криницький О.С. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтовій галузі: навчальний посібник – Івано-Франківськ:ІФНТУНГ, 2017. 348с.
6. Козловський М.П. Вплив зовнішнього поля на критичну поведінку тривимірних систем. – Львів: Вид-во "Галицький друкар", 2012. – 332 с.
7. Себко В.В., Здоренко В.Г. Метод неруйнівного контролю зразка водного розчину адипінової кислоти. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – Київ: КНУТД, 2016. – №1 (94). С. 121 – 127.
8. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львів: СПОЛОМ, 2013. - 268.
9. Маєвський С.М. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 3,46 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 288 с.

10. Тетерко А.Я. Метод формування інформаційного сигналу та підвищення точності вихрострумowego контролю питомої електричної провідності матеріалу із виключенням впливу зазору / А.Я. Тетерко, Г.Г. Луценко, В.І. Гутник, О.А. Тетерко // Відбір і обробка інформації. Львів, 2016. – Вип. 43 (119). С.5–11.

11. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумовой контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.

12. Куц Ю.В., Редька М.О., Близнюк О.Д. Метод виявлення сигналів вихрострумowego неруйнівного контролю на фоні шуму за кількістю нулів процесу. Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи МІВТС-2020: зб. тез доп. VII Міжнар. наук.-техн. конф, 2020 р. Харків, 2020. С. 71–72.

13. Pyrozhenko Ye.V., Sebko V.V., Zdorenko V.G., Zashchepkina N.M., Markina O.M. Informative testing method of beer sewage samples for mini-breweries. Journal of Materials Science and Engineering 1 (106) (2020). P. 28-41.

14. Sebko V.V., Zashchepkina N.M., Zdorenko V.G., Barylko S.V. Increasing the accuracy of measuring the physicochemical parameters of wastewater samples when implementing a new informative method, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 118/1 (2023). P. 28-41.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Залежності амплітуди і фази сигналу ТЕД від x_t

x_t	k_t	φ_t	$\operatorname{tg}\varphi_t$
0,0	1,000000	0,000	0,000000
0,1	0,999999	-0,072	-0,001250
0,2	0,999979	-0,286	-0,005000
0,3	0,999895	-0,645	-0,011249
0,4	0,999667	-1,146	-0,019996
0,5	0,999187	-1,789	-0,031235
0,6	0,998318	-2,574	-0,044954
0,7	0,996891	-3,498	-0,061135
0,8	0,994717	-4,559	-0,079745
0,9	0,991585	-5,752	-0,100734
1,0	0,987275	-7,070	-0,124033
1,1	0,981563	-8,505	-0,149544
1,2	0,974239	-10,045	-0,177140
1,3	0,965118	-11,676	-0,206661
1,4	0,954059	-13,382	-0,237906
1,5	0,940975	-15,144	-0,270636
1,6	0,925849	-16,939	-0,304575
1,7	0,908738	-18,748	-0,339408
1,8	0,889775	-20,546	-0,374792
1,9	0,869163	-22,311	-0,410359
2,0	0,847162	-24,024	-0,445730
2,1	0,824074	-25,666	-0,480527
2,2	0,800221	-27,221	-0,514384
2,3	0,775929	-28,677	-0,546965
2,4	0,751507	-30,027	-0,577973
2,5	0,727238	-31,265	-0,607162

Продовження таблиці А.1

2,6	0,703368	-32,389	-0,634342
2,7	0,680100	-33,400	-0,659387
2,8	0,657592	-34,303	-0,682232
2,9	0,635963	-35,102	-0,702872
3,0	0,615292	-35,805	-0,721354
3,1	0,595625	-36,419	-0,737768
3,2	0,576979	-36,952	-0,752243
3,3	0,559350	-37,413	-0,764931
3,4	0,542715	-37,811	-0,776000
3,5	0,527038	-38,154	-0,785629
3,6	0,512274	-38,449	-0,793994
3,7	0,498373	-38,704	-0,801267
3,8	0,485280	-38,925	-0,807611
3,9	0,472939	-39,117	-0,813173
4,0	0,461295	-39,286	-0,818089
4,1	0,450295	-39,436	-0,822476
4,2	0,439888	-39,572	-0,826437
4,3	0,430025	-39,695	-0,830059
4,4	0,420662	-39,808	-0,833414
4,5	0,411757	-39,915	-0,836563
4,6	0,403273	-40,015	-0,839551
4,7	0,395175	-40,111	-0,842418
4,8	0,387432	-40,204	-0,845190
4,9	0,380017	-40,294	-0,847889
5,0	0,372904	-40,382	-0,850531
5,1	0,366070	-40,468	-0,853124
5,2	0,359497	-40,553	-0,855675
5,3	0,353165	-40,636	-0,858186

Продовження таблиці А.1

5,4	0,347060	-40,717	-0,860659
5,5	0,341167	-40,797	-0,863093
5,6	0,335473	-40,876	-0,865486
5,7	0,329966	-40,953	-0,867835
5,8	0,324638	-41,028	-0,870138
5,9	0,319477	-41,101	-0,872393
6,0	0,314476	-41,173	-0,874596
6,1	0,309628	-41,243	-0,876747
6,2	0,304924	-41,310	-0,878843
6,3	0,300359	-41,376	-0,880882
6,4	0,295927	-41,440	-0,882866
6,5	0,291621	-41,502	-0,884792
6,6	0,287437	-41,562	-0,886662
6,7	0,283370	-41,620	-0,888476
6,8	0,279415	-41,677	-0,890235
6,9	0,275568	-41,731	-0,891940
7,0	0,271824	-41,784	-0,893592
7,1	0,268180	-41,835	-0,895194
7,2	0,264632	-41,884	-0,896746
7,3	0,261175	-41,932	-0,898251
7,4	0,257808	-41,978	-0,899711
7,5	0,254526	-42,023	-0,901127
7,6	0,251326	-42,066	-0,902501
7,7	0,248206	-42,108	-0,903836
7,8	0,245163	-42,149	-0,905132
7,9	0,242193	-42,189	-0,906393
8,0	0,239294	-42,227	-0,907618

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Вихідні дані	5
2. Терміни та визначення неруйнівного контролю.....	7
3. Розрахунок електричних параметрів ТЕД при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів НК.....	9
4. Визначення електричних та температурних параметрів немагнітних циліндричних виробів (обернена задача).....	17
5. Чисельний приклад розрахунку електричних параметрів ТЕД (пряма задача) для температурної точки $t = 70^{\circ}\text{C}$	23
6. Чисельний приклад розрахунку електричних і температурних параметрів немагнітних виробів при реалізації амплітудного і фазового електромагнітних методів (обернена задача), $t = 70^{\circ}\text{C}$	25
Контрольні питання	29
Список використаних джерел.....	31
Додаток А	33

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання індивідуального розрахункового завдання
з дисципліни «Методи контролю шкідливих речовин у зразках повітря,
грунту, води та продовольчої сировини»
для здобувачів першого рівня вищої освіти
спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» усіх форм
навчання

Укладачі:

СЕБКО Вадим Вадимович

ТИХОМИРОВА Тетяна Сергіївна

БОСЮК Альона Сергіївна

Відповідальний за випуск
Роботу рекомендував до друку

Шестопалов О.В.
проф. Самойленко Н.М.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 832

Підп. до друку Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія