

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Методичні рекомендації до практичних занять

з дисципліни

«ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

(для здобувачів вищої освіти спеціальності G3 Електрична інженерія)
(Електронне видання)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії
Протокол № 8 від 12.02.2026 р.

Київ – 2026

УДК 621.313.001.24(075.8)
М545

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електроматеріалознавство». (для здобувачів вищої освіти спеціальності G3 Електрична інженерія) // Укладачі: Ю.А. Романченко, М.О. Морнева. – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2026. – 42с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти денної форми навчання, які вивчають дисципліну «Електроматеріалознавство». Посібник містить вирішені типові завдання за такими розділами: 1. Провідникові матеріали. 2. Напівпровідникові матеріали. 3. Діелектричні матеріали. 4. Магнітні матеріали.

Методичні матеріали розраховані на студентів вищих навчальних закладів.

Укладачі

Ю. А. Романченко, к.т.н., доц.
Є. С. Руднєв, д.т.н., доц
М. О. Морнева, к.т.н., доц.

Рецензент

І.В. Мелконова, к.т.н., доц.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Практичне заняття 1	
Провідникові матеріали. Розрахунок та порівняння розмірів та маси дротів з різних матеріалів	5
Практичне заняття 2	
Визначення ємності свинцевого високовольтного кабеля, розрахунок напруженості електричного поля в ізоляції кабеля	9
Практичне заняття 3	
Розрахунок допустимої щільності струму і надійності роботи установки з даними дротами	12
Практичне заняття 4	
Опорні стрижневі ізолятори. Позначення. Визначення повного струму витoku. Розрахунок ємності ізолятора. Розрахунок діелектричних втрат в опорних ізоляторах	20
Практичне заняття 5	
Діелектричні матеріали. Визначення напруги пробою	25
Практичне заняття 6	
Залежність електричного заряду від величини прикладеної напруги	28
Практичне заняття 7	
Розрахунок діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат. Порівняльна оцінка полярності досліджуваних матеріалів	30
Практичне заняття 8	
Криві намагнічування електротехнічних сталей. Апроксимація кривої намагнічування трансформатора	33
Практичне заняття 9	
Властивості груп матеріалів. Розрахунок діючої магнітної проникності зразків від довжини зразка, введеного в котушку	38
ЛІТЕРАТУРА.....	41

ВСТУП

Сучасний розвиток електроенергетики, електротехніки та електроніки значною мірою залежить від властивостей і якості матеріалів, що використовуються у виробництві електротехнічних пристроїв, машин та апаратів. Саме тому ґрунтовне вивчення електротехнічних матеріалів, їх фізичних, електричних, теплових і механічних характеристик є необхідною умовою формування професійних компетентностей майбутніх фахівців.

Практичні заняття з дисципліни спрямовані на закріплення теоретичних знань, отриманих під час лекцій, а також на формування навичок аналізу властивостей електротехнічних матеріалів, визначення їх характеристик та обґрунтування вибору матеріалів для різних електротехнічних застосувань. У процесі виконання практичних робіт здобувачі освіти знайомляться з основними видами провідникових, напівпровідникових, діелектричних та магнітних матеріалів, вивчають їх структуру, властивості та сфери використання в електротехнічній галузі.

Методичні вказівки містять тематику практичних занять, короткі теоретичні відомості, а також рекомендації щодо розв'язання задач і оформлення результатів роботи. Виконання запропонованих завдань сприятиме поглибленню знань з електроматеріалознавства, розвитку аналітичного мислення та формуванню практичних навичок, необхідних для майбутньої професійної діяльності.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти технічних спеціальностей, які вивчають дисципліну «Електроматеріалознавство», і можуть бути використані під час підготовки до практичних занять, самостійної роботи та контролю знань.

Практичне заняття 1
ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.
РОЗРАХУНОК ТА ПОРІВНЯННЯ РОЗМІРІВ ТА МАСИ ДРОТІВ З
РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

Загальні відомості

Провідникові матеріали широко застосовуються в електротехніці та електроенергетиці для передавання електричної енергії, виготовлення обмоток електричних машин і трансформаторів, струмопровідних шин, кабелів та інших елементів електротехнічного обладнання. Основною вимогою до таких матеріалів є висока електропровідність, що забезпечує мінімальні втрати електричної енергії під час проходження струму. Крім того, провідникові матеріали повинні мати достатню механічну міцність, технологічність обробки, корозійну стійкість та прийнятну вартість.

Найбільш поширеними провідниковими матеріалами є мідь, алюміній та їх сплави. Мідь характеризується дуже високою електропровідністю, хорошими механічними властивостями та високою надійністю в експлуатації, тому широко використовується для виготовлення проводів, кабелів та обмоток електричних машин. Алюміній має дещо меншу електропровідність порівняно з міддю, однак відзначається меншою густиною та нижчою вартістю, що робить його доцільним для застосування у повітряних лініях електропередачі та інших конструкціях, де важливими є маса та економічність.

Важливою характеристикою провідникових матеріалів є питомий електричний опір, який визначає здатність матеріалу проводити електричний струм. Опір провідника залежить не лише від властивостей матеріалу, але й від його геометричних параметрів – довжини та площі поперечного перерізу. Тому під час проектування електротехнічних пристроїв необхідно враховувати як електричні властивості матеріалу, так і масу та розміри провідника.

У практиці електротехніки часто виникає потреба порівнювати провідники, виготовлені з різних матеріалів, за умов однакової електричної

провідності або допустимих втрат потужності. У таких випадках визначають необхідний переріз провідника, його довжину, масу та інші параметри. Це дозволяє оцінити доцільність використання того чи іншого матеріалу з урахуванням технічних та економічних показників.

У межах даного практичного заняття розглядаються основні властивості провідникових матеріалів, а також виконується розрахунок і порівняння геометричних розмірів та маси дротів, виготовлених з різних матеріалів, за заданих умов роботи. Це дає можливість наочно оцінити вплив фізичних властивостей матеріалів на параметри провідників та зробити обґрунтований вибір матеріалу для конкретних електротехнічних застосувань.

Задача 1

Порівняйте розміри та масу 1 км алюмінієвого дроту з площею перерізу 6 мм^2 та біметалевого дроту сталь-мідь (сталь – осердя), які мають однакову провідність. Прийняти площу перерізу міді у біметалевому дроті відносно сталі 100%.

Послідовність розв’язання

Для розв’язування задач необхідно змодельовати біметалевий дріт паралельним з’єднанням двох опорів, які відповідають сталі і міді. Тоді

$$R_{\sigma} = \frac{R_c \cdot R_m}{R_c + R_m}; \quad R_m = \frac{\rho_m l}{S_m}; \quad R_c = \frac{\rho_c l}{S_c}; \quad (1)$$

$$S_{\sigma} = S_m + S_c; \quad S_m = \frac{c S_{\sigma}}{1 + c}; \quad S_c = \frac{S_{\sigma}}{1 + c}; \quad (2)$$

$$c = \frac{D_{\text{відн}}}{100},$$

де $D_{\text{відн}}$ – переріз міді відносно сталі.

На першому кроці знаходимо опір алюмінієво дроту

$$R_a = \frac{\rho_a l}{S_a}.$$

Якщо тепер підставити значення S_m і S_c (2) в R_m і R_c (1), а потім R_m і R_c в R_δ і прирівняти R_δ до вихідних значень опорів R_a , то після підстановки чисельних значень заданих параметрів отримаємо просте рівняння відносно S_δ . По S_δ потім знаходимо S_m і S_c .

Маса алюмінієвого дроту в задачах знаходиться за формулою

$$M_a = d_a S_a l,$$

де d_a – густина алюмінію, l довжина дроту.

Аналогічно за відповідними формулами знаходять M_m і M_c .

Приклад розв'язання задачі 1

Дано:	Розв'язання
$D_{відн} = 100\%$	1) $R_a = \frac{\rho_a l}{S_a} = \frac{0,0265 \cdot 10^{-6} \cdot 1000}{6 \cdot 10^{-6}} = 4,42 \text{ (Ом)}$
$l = 1 \text{ км}$	
$S_a = 6 \text{ мм}^2$	За умовою $R_a = R_\delta$.
$S_\delta - ?$	$\rho_a = 0,0265 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ – питомий опір алюмінію (табличне значення).
$M_a - ?$	
$M_\delta - ?$	
	2) $c = \frac{D_{відн}}{100} = \frac{100}{100} = 1.$

3) Підставляємо значення S_m і S_c в формули для R_m і R_c

$$R_m = \frac{\rho_m l}{S_m} = \frac{\rho_m l (1+c)}{c \cdot S_\delta};$$

$$R_c = \frac{\rho_c l}{S_c} = \frac{\rho_c l (1+c)}{S_\delta}.$$

4) Підставивши R_m і R_c в формулу для R_δ , і виконавши скорочення, отримаємо

$$R_\delta = \frac{R_c \cdot R_m}{R_c + R_m} = \frac{2\rho_c \rho_m l}{S_\delta (\rho_c + \rho_m)}$$

$$\text{Звідси } S_\delta = \frac{2\rho_c \rho_m l}{R_\delta (\rho_c + \rho_m)} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{4,5 \cdot 10^{-6} \cdot (0,15 + 0,0168)} = 6,7 \cdot 10^{-6} = 6,7 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$\rho_c = 0,15 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ – питомий опір сталі (табличне значення);

$\rho_m = 0,0168 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ – питомий опір міді (табличне значення).

$$5) S_m = \frac{cS_{\delta}}{1+c} = \frac{1 \cdot 6,7 \cdot 10^{-6}}{1+1} = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 3,35 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

$$6) S_c = \frac{S_{\delta}}{1+c} = \frac{6,7 \cdot 10^{-6}}{1+1} = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 3,35 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

7) Знаходимо масу алюмінієвого дроту

$$M_a = d_a S_a l = 2700 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 16,2 \text{ (кг)}.$$

$d_a = 2,7 \text{ г/см}^3 = 2700 \text{ кг/м}^3$ – густина алюмінію (табличне значення).

8) Знаходимо масу сталевого дроту

$$M_c = d_c S_c l = 7800 \cdot 3,35 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 26,13 \text{ (кг)}.$$

$d_c = 7,7\text{--}7,9 \text{ г/см}^3 = 7700\text{--}7900 \text{ кг/м}^3$ – густина сталі (табличне значення).

9) Знаходимо масу мідного дроту

$$M_m = d_m S_m l = 8920 \cdot 3,35 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 29,9 \text{ (кг)}.$$

$d_m = 8,92 \text{ г/см}^3 = 8920 \text{ кг/м}^3$ – густина міді (табличне значення).

$$10) S_c = S_m = \frac{S_{\delta}}{1+c} = \frac{6,7 \cdot 10^{-6}}{1+1} = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 3,35 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

$$11) M_{\delta} = M_c + M_m = 26,13 + 29,9 = 56,03 \text{ (кг)}$$

Відповідь: $S_{\delta} = 6,7 \text{ мм}^2$; $M_a = 16,2 \text{ кг}$; $M_{\delta} = 56,03 \text{ кг}$.

Практичне заняття 2

ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ СВИНЦЕВОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ, РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЯ

Загальні відомості

Високовольтні кабелі застосовуються для передавання та розподілу електричної енергії в електроенергетичних системах. Одним із поширених типів силових кабелів є кабелі зі свинцевою оболонкою, яка виконує функції захисту ізоляції від вологи, механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Свинцева оболонка забезпечує герметичність кабелю та підвищує його надійність під час експлуатації.

Конструктивно високовольтний кабель складається із струмопровідної жили, шару електричної ізоляції та металевої оболонки. Ізоляційний шар відокремлює провідник від оболонки та забезпечує електричну міцність кабелю. У багатьох випадках ізоляція виконується з паперу, просоченого спеціальними діелектричними складами, або з полімерних матеріалів, що мають високі діелектричні властивості.

У процесі експлуатації кабель можна розглядати як електричний конденсатор циліндричної форми, в якому струмопровідна жила виконує роль внутрішнього електрода, а свинцева оболонка – зовнішнього електрода. Ізоляційний шар між ними є діелектриком. У зв'язку з цим кабель має певну електричну ємність, величина якої залежить від геометричних розмірів кабелю, товщини ізоляції та діелектричної проникності ізоляційного матеріалу. Ємність кабелю впливає на режим роботи електричної мережі, зокрема на виникнення ємнісних струмів та розподіл напруги вздовж лінії.

Важливою характеристикою високовольтного кабелю є напруженість електричного поля в ізоляції. Розподіл електричного поля в ізоляційному шарі циліндричного кабелю є нерівномірним: максимальне значення напруженості виникає на поверхні струмопровідної жили і зменшується у напрямку до

металевої оболонки. Якщо напруженість електричного поля перевищує допустиме значення для даного ізоляційного матеріалу, це може призвести до часткових розрядів, старіння ізоляції або її електричного пробою.

Тому під час проектування та експлуатації кабельних ліній важливим є визначення ємності кабелю та розрахунок напруженості електричного поля в ізоляції. Це дозволяє оцінити електричні параметри кабелю, перевірити відповідність умовам безпечної роботи та забезпечити надійну експлуатацію кабельних ліній електропередачі.

У даному практичному занятті розглядаються основні співвідношення для визначення ємності свинцевого високовольтного кабелю, а також виконується розрахунок розподілу та максимального значення напруженості електричного поля в його ізоляції залежно від конструктивних параметрів кабелю та прикладеної напруги.

Задача 2

Живлення електричної установки здійснюється трифазним струмом за допомогою трьох свинцевих високовольтних кабелів.

Визначити ємність одного свинцевого високовольтного кабелю, мінімальну і максимальну напруженості електричного поля в ізоляції кабелю і реактивну (зарядову) потужність в ньому, якщо відомі: лінійна напруга $U = 6$ кВ, частота поля $f = 50$ Гц, перетин алюмінієвої жили кабелю $S = 95$ мм², товщина паперової просоченої ізоляції $d = 5$ мм з діелектричної проникністю $\epsilon = 3,5$, довжина кабелю $l = 15$ км.

Послідовність розв'язання

Електричне поле кабелю подібно полю циліндричного конденсатора, яке характеризується осьовою симетрією. Послідовність розв'язання наступна.

1. Відповідно до теореми Гаусса, напруженість електричного поля по товщині ізоляції виражається формулою

$$E_x = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 2\pi r_x l}, \quad (1)$$

де q – заряд жили кабелю, Кл;

r_x – змінна величина, яка визначає гіперболічний закон зміни напруженості електричного поля по товщині ізоляції кабелю, м;

l – довжина кабелю, м;

E_x – напруженість електричного поля, кВ/м.

2. Напруга між жилою дроту і свинцевою оболонкою виражається через певний інтеграл вектору напруженості поля по шляху зменшення (знак мінус) потенціалу вздовж напрямку силових ліній:

$$U = \int_R^r E_x dx = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 2\pi l} \int_R^r \frac{dx}{r_x},$$

звідки

$$U = \frac{q}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l} \ln \frac{R}{r},$$

де $R=r+d$ – внутрішній радіус свинцевої оболонки, мм;

r – радіус мідної жили, мм;

d – товщина ізоляції, мм;

U – напруга, кВ.

3. Відповідно до визначення ємності кабелю, як відношення заряду до напруги, маємо

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}},$$

де C – ємність кабелю, Ф.

4. Підставивши в (1) $q = UC$, отримаємо

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}}, \text{ де } (r \leq x \leq R)$$

або

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \text{ у } E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}}$$

5. Реактивна потужність в кабелі (зарядна потужність) визначається з виразу

$$Q = \omega C U_{\phi}^2,$$

де $U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ – фазна напруга, В; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота поля, Гц.

Приклад розв’язання задачі 2

1. Визначаємо радіус алюмінієвої жили за формулою:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{95 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 0,0055 \text{ м},$$

де перетин жили кабелю $S = 95 \text{ мм}^2$.

2. Внутрішній радіус свинцевої оболонки

$$R = r + d = 0,0055 + 0,005 = 0,0105 \text{ м},$$

де товщина ізоляції $d = 5 \text{ мм}$.

3. Ємність кабелю C

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 8,85416 \cdot 10^{-12} \cdot 15000}{\ln \frac{0,0105}{0,0055}} = 4,51 \text{ мкФ},$$

де електрична постійна $\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, діелектрична проникність $\epsilon = 3,5$, довжина кабелю $l = 15 \text{ км}$.

4. Максимальна напруженість електричного поля

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{6000}{0,0055 \ln \frac{0,0105}{0,0055}} = 1687075,87 \text{ В/м} = 1687 \text{ кВ/м}$$

де напруга $U = 6 \text{ кВ}$.

5. Мінімальна напруженість електричного поля

$$E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}} = \frac{6000}{0,0105 \ln \frac{0,0105}{0,0055}} = 883706,4 \text{ В/м} = 833,7 \text{ кВ/м}.$$

6. Реактивна потужність в кабелі (зарядна потужність) визначається з виразу:

$$Q = \omega C U_{\phi}^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,51 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{6000}{\sqrt{3}} \right)^2 = 16993 \text{ Вар}.$$

де $U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ – фазна напруга, В; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота поля, Гц, частота електричного поля $f = 50$ Гц.

Відповідь: $C = 4,51 \text{ мкФ}$, $E_{\max} = 1687 \text{ кВ/м}$, $E_{\min} = 833,7 \text{ кВ/м}$, $Q = 16993 \text{ Вар}$.

Практичне заняття 3

РОЗРАХУНОК ДОПУСТИМОЇ ЩІЛЬНОСТІ СТРУМУ І НАДІЙНОСТІ РОБОТИ УСТАНОВКИ З ДАНИМИ ДРОТАМИ

Загальні відомості

Під час експлуатації електротехнічних установок важливим параметром, що визначає умови роботи провідників, є щільність електричного струму. Щільність струму характеризує величину струму, що проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника, і визначається як відношення сили струму до площі поперечного перерізу дроту. Цей параметр безпосередньо впливає на тепловий режим роботи провідників.

Проходження електричного струму через провідник супроводжується виділенням тепла внаслідок дії закону Джоуля–Ленца. Якщо щільність струму перевищує допустимі значення, провідник може перегріватися, що призводить до погіршення механічних властивостей матеріалу, старіння або пошкодження ізоляції, а в окремих випадках – до аварійних ситуацій. Тому для кожного типу провідникового матеріалу та умов його експлуатації встановлюються допустимі значення щільності струму.

Допустима щільність струму залежить від багатьох факторів, зокрема від матеріалу провідника, його перерізу, температурних умов навколишнього середовища, способу прокладання проводів, наявності ізоляції та умов охолодження. Наприклад, мідні провідники, як правило, допускають більшу щільність струму порівняно з алюмінієвими завдяки їх кращій електропровідності та теплопровідності.

Оцінювання допустимої щільності струму є необхідним етапом під час проектування електричних мереж та електроустановок. Правильний вибір перерізу провідників забезпечує надійну та безпечну роботу електричного обладнання, зменшує втрати електроенергії та запобігає перегріву провідників.

У межах даного практичного заняття виконується розрахунок допустимої щільності струму для заданих проводів, а також оцінюється надійність роботи

електротехнічної установки за умов протікання робочого струму. Отримані результати дозволяють визначити відповідність обраних провідників умовам експлуатації та зробити висновки щодо їх придатності для використання в електротехнічних системах.

Задача 3

Електрична установка, з потужністю $P = 1000$ Вт, живиться від електричної мережі напругою $U = 220$ В. Живляча лінія виконана дротами, що мають допустиму температуру нагріву $\theta_{don} = 85^\circ\text{C}$, та коефіцієнт тепловіддачі $\sigma = 3 \cdot 10^{-5}$ Вт/мм², перетин дротів $S = 0,75$ мм².

Розрахувати допустиму за умовами нагріву щільність струму і допустимий струм, порівняти його з робочим струмом і визначити надійність і економічність роботи установки з даними дротами. Матеріал дроту – мідь, матеріал ізоляції – поліетилен.

Послідовність розв’язання

Згідно ПУЕ (правила улаштування електроустановок) провідники будь-якого призначення повинні задовольняти вимогам щодо гранично допустимого нагріву. Кількість теплоти, що виділяється щомиті в проводі опором R в прохідному струмі I визначається виразом

$$\frac{W}{t} = I^2 R,$$

де W – кількість теплоти, Вт;

t – час, с.

Частина цього тепла йде на підвищення температури дроту, а інша частина розсіюється в навколишньому середовищі.

У сталому тепловому режимі кількість тепла, що розсіюється щомиті стане рівною кількості тепла, що виділяється струмом. Рівняння теплового балансу має такий вигляд

$$I^2 R = \sigma \cdot S_{\Pi} \cdot \theta_{уст},$$

де σ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/мм²·°C;

S_n – поверхня охолодження дроту, мм²;

$\theta_{уст}$ – усталена різниця температур дроту та навколишнього середовища:

$$\theta_{уст} = \theta_{дон} - \theta_{окр}.$$

Щільність струму визначається з виразу

$$\delta = \frac{I}{S},$$

де δ – щільність струму, А/мм².

Опір дроту

$$R = \frac{l}{\gamma S},$$

де l – довжина дроту, м;

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \text{ – перетин дроту (діаметр } d), \text{ мм}^2;$$

γ – питома провідність струмоведучої жили дроту (зворотна величині питомого опору), Ом⁻¹·м⁻¹;

R – опір дроту, Ом.

Приймаємо в першому наближенні, що поверхня охолодження дорівнює бічній поверхні циліндричного дроту, тобто

$$S_{II} = \pi dl \cdot 10^3,$$

де l виражено в мм.

Рівняння теплового балансу має вигляд

$$\delta^2 S^2 \frac{l}{\gamma S} = \sigma S_{II} \theta_{уст} \text{ або } \delta^2 \frac{\pi d^2 l}{4\gamma} = \sigma \pi dl \theta_{уст} \cdot 10^3.$$

Відповідно отримаємо, що щільність струму визначається з виразу:

$$\delta = \sqrt{\frac{4\sigma\theta_{уст}\gamma \cdot 10^3}{d}},$$

де δ – щільність струму, А/мм².

Допустима щільність струму $I_{\text{дон}}$ виходить, якщо в цей вираз підставити значення $\gamma = \gamma_0$, тобто питому провідність провідника при зміні температури до $\theta_{\text{дон}}$.

При нагріванні опір провідника зростає. Температурний коефіцієнт опору

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)},$$

де R_1 – опір провідника при температурі $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$, тобто температурі, для якої наводяться в довідниках питомі опори (провідності) матеріалів;

R_2 – опір провідника, який відповідає температурі: $\theta_{\text{дон}} = \theta_2$;

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)].$$

При нагріванні дроту до θ_2 його питомий опір зростає до значення

$$\rho_\theta = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)].$$

тоді

$$\gamma_\theta = \frac{1}{\rho_\theta},$$

Параметри ρ , γ та α задаються в довідниках для кожного матеріалу провідника. Отримавши для граничної температури $\delta = \delta_{\text{дон}}$, визначаємо тривало допустимий струм:

$$I_{\text{дон}} = \delta_{\text{дон}} \cdot S,$$

де S – площа перетину дроту, мм^2 .

Робочий струм визначається за формулою:

$$I_{\text{роб}} = \frac{P}{U},$$

де $I_{\text{роб}}$ – робочий струм, А.

Після отриманих результатів необхідно зробити висновок про роботу установки.

Приклад розв'язання задачі 3

1. Усталена різниця температур дроту та навколишнього середовища

$$\theta_{уст} = \theta_{дон} - \theta_{сер} = 85 - 20 = 65^{\circ}\text{C}.$$

2. Рівняння теплового балансу має такий вигляд

$$I^2 R = \sigma \cdot S_{\Pi} \cdot \theta_{уст} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 3067,78 \cdot 65 = 5,9,$$

де σ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/мм²·град;

S_n – поверхня охолодження дроту, мм²;

$\theta_{уст}$ – усталена різниця температур дроту та навколишнього середовища.

3. Діаметр дроту

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,75}{3,14}} = 0,977 \text{ мм},$$

де $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – перетин дроту, мм².

4. Питома провідність струмоведучої жили проводу γ (зворотна величині питомого опору):

$$\rho_{мідь} = 0,017241 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 0,017241 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 0,017241 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{мм},$$

$$\gamma = 58 \text{ МОм}^{-1} \text{ м}^{-1} = 58001,27 \text{ Ом}^{-1} \text{ мм}^{-1}.$$

5. Опір дроту

$$R = \frac{l}{\gamma S} = \frac{1 \text{ м}}{58 \text{ МОм}^{-1} \text{ м}^{-1} \cdot 0,75 \text{ мм}^2} = \frac{1}{58 \cdot 10^6 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6}} = 0,023 \text{ Ом},$$

де l – довжина дроту, м;

S – переріз проводу діаметром d , мм².

6. Приймаємо в першому наближенні, що поверхня охолодження дорівнює бічній поверхні циліндричного проводу, тобто

$$S_{\Pi} = \pi \cdot d \cdot l \cdot 10^3 = 3,14 \cdot 0,977 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 10^3 = 3067,78 \text{ мм}^2$$

де l – довжина дроту, мм.

7. Щільність струму визначається з виразу:

$$\delta = \sqrt{\frac{4\sigma\theta_{уст}\gamma \cdot 10^3}{d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 65 \cdot 58001,27}{0,977}} = 21 \text{ А/мм}^2,$$

де δ – щільність струму, А/мм².

8. При нагріві дроту до θ_2 його питомий опір зростає до значення

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] = 0,017 [1 + 0,0043(85 - 20)] = 0,022,$$

де $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт питомого опору міді,

$\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ – температура, для якої наводяться в довідниках питомі опору (провідності) матеріалів.

9. Питома провідність струмоведучої жили проводу γ

$$\gamma_{\theta} = \frac{1}{\rho_{\theta}} = \frac{1}{0,02176} = 45,96 \text{ МОм}^{-1}\text{м}^{-1}.$$

10. Визначаємо допустиму щільність струму з виразу

$$\delta_{\text{дон}} = \sqrt{\frac{4\sigma_{\text{уст}}\gamma_{\theta} \cdot 10^3}{d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 65 \cdot 45960}{0,977}} = 19 \text{ А/мм}^2,$$

11. Визначаємо тривало допустимий струм

$$I_{\text{дон}} = \delta_{\text{дон}} \cdot S = 19,16 \cdot 0,75 = 14,37 \text{ А},$$

де S – площа перетину дроту, мм².

12. Робочий струм визначається за формулою:

$$I_{\text{роб}} = \frac{P}{U} = \frac{1000}{220} = 4,545 \text{ А},$$

де $I_{\text{роб}}$ – робочий струм, А.

Допустимий струм більше робочого майже в 3 рази, тому установка буде працювати надійно.

Відповідь: $\delta_{\text{дон}} = 19 \text{ А/мм}^2$, $I_{\text{дон}} = 14,37 \text{ А}$, $I_{\text{роб}} = 4,545 \text{ А}$. Допустимий струм більше робочого майже в 3 рази, тому установка буде працювати надійно.

Практичне заняття 4
ОПОРНІ СТРИЖНЕВІ ІЗОЛЯТОРИ.
ПОЗНАЧЕННЯ. ВИЗНАЧЕННЯ ПОВНОГО СТРУМУ ВИТОКУ.
РОЗРАХУНОК ЄМНОСТІ ІЗОЛЯТОРА.
РОЗРАХУНОК ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В ОПОРНИХ ІЗОЛЯТОРАХ

Загальні відомості

Опорні стрижневі ізолятори, як правило, представляють собою суцільні керамічні стрижні з виступаючими ребрами. На торцевих частинах ізоляторів закріплені металеві фланці (електроди) з нарізними отворами для кріплення на апаратах і в розподільчих пристроях.

У позначеннях типів опорних стрижневих ізоляторів букви і цифри позначають:

О – опорний,

Н – зовнішньої установки;

С – стрижневий;

1-ша цифра – нормальна напруга, кВ;

2-а цифра – мінімальне руйнівне навантаження на вигин.

Наприклад, ОНС-35-2000 (опорний стрижневий ізолятор зовнішньої установки на напругу 35 кВ, руйнівне навантаження його 2000 Па). Опорний стрижневий ізолятор типу ОНС (див. рис. 1) має наступні основні розміри: h – висота, мм; A – діаметр керамічного стрижня, мм; D – діаметр, що враховує величину виступаючих ребер, які збільшують довжину шляху витоку струму по поверхні ізолятора, мм.

Задача 4

Опорний стрижневий керамічний ізолятор ОНС ізолює і підтримує шини контактних деталей у відкритому розподільчому пристрої. Ізолятор представляє собою суцільний круглий стрижень з виступаючими ребрами. На торцевих частинах ізолятора закріплені металеві фланці (ковпаки), що є електродами

(рис. 1). Визначити повний струм витoku, що протікає в ізоляторі, ємність і діелектричні втрати в ньому, якщо відомі: номінальна напруга на ньому U_H ; частота електричного поля f ; розміри і основні електричні параметри діелектрика, з якого виготовлений ізолятор – ρ_s , ρ_v , $\operatorname{tg}\delta$ та інші. Матеріал ізолятора – електрофарфор, питомий об'ємний опір $\rho_v = 7 \cdot 10^{10}$ Ом·м; питомий поверхневий опір $\rho_s = 10^{12}$ Ом, відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 6$, тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta = 0,025$, напруга $U = 10$ кВ, висота ізоляції (дорівнює висоті стрижня) $h = 170$ мм; діаметр, що враховує величину виступаючих ребер, які збільшують довжину шляху витoku струму по поверхні ізолятора $D = 160$ мм, найменший діаметр стрижня $A = 140$ мм, частота $f = 50$ Гц.

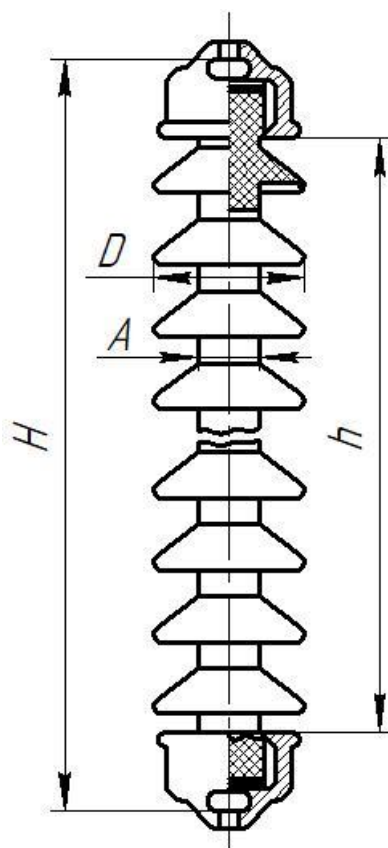


Рисунок 1 – Конструкція опорного ізолятора ОНБ зовнішньої установки

Послідовність розв'язання

1. Для визначення повного струму витoku слід враховувати струм витoku через обсяг ізолятора і струм витoku по його поверхні, а для цього треба визначити повний електричний опір опорного ізолятора за формулою

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}$$

де R_n – повний опір ізолятора, Ом;

R_v – об'ємний опір, Ом;

R_s – поверхневий опір, Ом.

Щоб спростити розв'язання задачі, довжину шляху проходження струму по поверхні ізолятора слід прийняти рівною $1,75 \cdot h$, тобто вважати в 1,75 рази більше довжини проходження струму за об'ємом.

Довжину електрода (фланця), що стикається з поверхнею, розрахувати по діаметру A . Пам'ятати, що об'ємний електричний опір залежить від питомого об'ємного опору і розмірів ізолятора (ρ_v, S, h), а поверхневий опір залежить від питомого поверхневого опору, довжини окружності стрижня, що стикається з електродом, і висоти стрижня-ізолятора (ρ_s, b, h).

2. При розрахунку ємності ізолятора площа електрода, що знаходиться під напругою, слід визначати за найменшим діаметром стрижня A , а відстань між електродами буде дорівнювати висоті стрижня h .

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h}$$

де C – ємність конденсатора, Ф.

3. Діелектричні втрати в опорному ізоляторі складаються з втрат на поляризацію в матеріалі стрижня і з втрат, зумовлених наскрізною провідністю, тобто це активна потужність, що розсіюється в ізоляторі, яка викликає його нагрівання P_a .

4.
$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$$

5. Всі величини в розрахункові формули треба підставляти в одиницях СІ.

Приклад розв'язання задачі 4

1. Визначаємо загальний опір зразку матеріалу R_v товщина h , м при площі S м² електроду:

$$R_v = \frac{\rho_v \cdot h}{S} = \frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 0,17}{0,785 \cdot 0,14^2} = 77,3 \cdot 10^{10} \text{ Ом} = 773430 \text{ МОм},$$

де об'ємний електричний опір $\rho_v = 7 \cdot 10^{10}$ Ом·м, висота ізолятора $h = 170$ мм, найменший діаметр стержня $A = 140$ мм.

2. Знаходимо поверхневий опір по формулі:

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{h}{\pi(D + A)} = 10^{12} \cdot \frac{0,17 \cdot 1,75}{3,14 \cdot (0,14 + 0,16)} = 315817 \text{ МОм},$$

де найменший діаметр стержня $A = 140$ мм, питомий поверхневий опір $\rho_s = 10^{12}$ Ом, висота ізоляції (висоті стрижня) $h = 170$ мм.

3. Обчислюємо повний опір ізолятора за рівнянням:

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s} = \frac{1}{773430000000} + \frac{1}{315817400000} = 4,245 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1},$$
$$R_n = 235571 \text{ МОм}.$$

4. Визначаємо повний струм витоку:

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_n} = \frac{10000}{235571 \cdot 10^6} = 0,04 \cdot 10^{-6} = 0,04 \text{ мкА}.$$

5. Розраховуємо ємність ізолятора за формулою:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h} = \frac{6 \cdot 8,85416 \cdot 10^{-12} \cdot 0,785 \cdot 0,14^2}{0,17} = 4,81 \cdot 10^{-12} = 4,81 \text{ пФ}.$$

де електрична постійна $\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; відносна діелектрична проникність $\epsilon = 6$, висота ізоляції (висоті стрижня) $h = 170$ мм, найменший діаметр стрижня $A = 140$ мм.

6. Визначасмо діелектричні втрати в опорному ізоляторі P_a

$$P_a = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

$$P_a = 10000^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4,81 \cdot 10^{-12} \cdot 0,025 = 37,76 \cdot 10^{-4} = 3,776 \text{ мВт},$$

де напруга $U = 10$ кВ, частота $f = 50$ Гц, тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta = 0,025$.

Відповідь: $I_e = 0,04$ мкА; $C = 4,81$ пФ; $P_a = 3,776$ мВт.

Практичне заняття 5
ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.
ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ ПРОБОЮ

Загальні відомості

Діелектричні матеріали широко застосовуються в електротехніці та електроенергетиці як електроізоляційні матеріали, основною функцією яких є запобігання проходженню електричного струму між струмопровідними частинами, що перебувають під різними потенціалами. Вони використовуються в ізоляції кабелів, електричних машин, трансформаторів, конденсаторів, вимірювальних приладів та іншого електротехнічного обладнання. Основною вимогою до діелектриків є висока електрична міцність, тобто здатність витримувати значні електричні поля без втрати ізоляційних властивостей.

Однією з найважливіших характеристик діелектричних матеріалів є напруга пробою. Пробій діелектрика – це процес різкого зростання електропровідності матеріалу під дією сильного електричного поля, внаслідок чого ізоляція втрачає свої властивості і через неї починає протікати значний електричний струм. Це явище супроводжується руйнуванням структури матеріалу і може призвести до пошкодження або виходу з ладу електричного обладнання.

Напруга пробою залежить від ряду факторів, зокрема від товщини ізоляційного шару, виду та структури матеріалу, температури, вологості, тривалості дії електричного поля та наявності дефектів у матеріалі. Для характеристики електричної міцності діелектрика часто використовують також поняття пробивної напруженості електричного поля, яка визначається як відношення напруги пробою до товщини діелектричного шару.

У практиці електротехніки важливо знати граничні значення напруги, які може витримувати ізоляційний матеріал без руйнування. Це дозволяє правильно вибирати матеріали та визначати необхідну товщину ізоляції для забезпечення надійної і безпечної роботи електричних установок.

У межах даного практичного заняття розглядаються основні властивості діелектричних матеріалів, а також виконується визначення напруги пробою ізоляційного матеріалу та оцінка його електричної міцності. Отримані результати дають можливість проаналізувати ізоляційні властивості досліджуваного матеріалу та зробити висновки щодо можливості його використання в електротехнічних пристроях.

Задача 5

Між тонкими плоскими електродами вміщено пластинку діелектрика товщиною $h = 18 \cdot 10^{-2}$ мм. Діелектрична проникність цього матеріалу $\varepsilon = 5,2$, теплопровідність $\lambda = 0,125$ Вт/(м·К), температура навколишнього середовища $T_2 = 50^\circ\text{C}$. Визначте пробивну напругу пластинки при електротепловому пробі, нехтуючи перепадом температури в електродах, якщо частота прикладеної напруги $f = 40$ Гц. Значення функції $\varphi(c)$ наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення функції $\varphi(c)$

c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$
0,010	0,040	0,09	0,123	1,0	0,37
0,015	0,050	0,10	0,130	1,5	0,43
0,020	0,065	0,15	0,160	2,0	0,46
0,055	0,100	0,20	0,180	4,0	0,54
0,060	0,103	0,40	0,260	4,5	0,55
0,070	0,110	0,60	0,300	5,0	0,56
0,080	0,118	0,90	0,360	9,0	0,60

Послідовність розв'язання

При тепловому пробі плоского діелектрика пробивна напруга

$$U_{np} = 3,82 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha f \varepsilon \operatorname{tg} \delta}} \varphi(c)$$

де ε , $\operatorname{tg} \delta$ – характеристики діелектрика при температурі навколишнього середовища;

α – стала, що характеризує зростання $\operatorname{tg} \delta$ з температурою;

c – параметр, що характеризує умови відведення теплоти від діелектрика у зовнішнє середовище.

Прийнято, що $tg\delta$ зростає з температурою за експоненціальним законом:

$$tg\delta = tg\delta_0 \exp(\alpha(T_2 - T_1)).$$

При розв'язуванні задач значення ε задається умовою і вважається сталим. Сталу α , виходячи з температурної залежності $tg\delta$ можна визначити так:

$$\alpha = \frac{\ln(tg\delta/tg\delta_0)}{T_2 - T_1}.$$

Для плоских зразків, якщо знехтувати товщиною електродів можна прийняти

$$c = \frac{\sigma h}{2\lambda},$$

де λ – теплопровідність діелектрика; h – його товщина;

σ – коефіцієнт тепловіддачі теплоти у зовнішнє середовище, для повітря $\sigma = 13$ Вт/м.

Значення функції $\varphi(c)$ обираємо з таблиці 5.1.

Приклад розв'язання задачі 5

Дано:	Розв'язання
$tg\delta_0 = 0,05$	1) $\alpha = \frac{\ln(tg\delta/tg\delta_0)}{T_2 - T_1} = \frac{\ln(0,1/0,05)}{50 - 20} = 0,023$
$tg\delta = 0,1$	2) Враховуючи, що для повітря $\sigma = 13$ Вт/м,
$T_1 = 20^\circ\text{C}$	$c = \frac{\sigma h}{2\lambda} = \frac{13 \cdot 18 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,125} = 0,009 \approx 0,01$
$T_2 = 50^\circ\text{C}$	Тоді за таблицею 5.1 $\varphi(c) = 0,04$
$\lambda = 0,125$ Вт/(м·К)	$U_{np} = 3,82 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha f \varepsilon tg\delta}} \varphi(c) = 3,82 \cdot 10^5 \cdot$
$h = 18 \cdot 10^{-2}$ мм	3) $\sqrt{\frac{0,125}{0,023 \cdot 40 \cdot 5,2 \cdot 0,1}} \cdot 0,04 = 2470 \text{ В} = 2,47 \text{ кВ.}$
$\varepsilon = 5,2$	
$f = 40$ Гц	
$U_{np} - ?$	
Відповідь: $U_{np} = 2,47$ кВ.	

Практичне заняття 6

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ ВІД ВЕЛИЧИНИ ПРИКЛАДЕНОЇ НАПРУГИ

Загальні відомості

Електричний заряд є однією з основних фізичних величин, що характеризує електричний стан тіл і визначає їх здатність взаємодіяти в електричному полі. У багатьох електротехнічних пристроях, зокрема в конденсаторах, заряд накопичується на провідниках під дією прикладеної напруги. Дослідження залежності електричного заряду від величини прикладеної напруги має важливе значення для розуміння процесів накопичення та зберігання електричної енергії.

У реальних електротехнічних системах характер залежності заряду від напруги може змінюватися під впливом властивостей діелектрика, температури, частоти прикладеної напруги та інших факторів. Для більшості лінійних діелектриків у певному діапазоні напруг ця залежність залишається близькою до лінійної. Однак у деяких матеріалах за великих напруженостей електричного поля можуть виникати нелінійні ефекти, пов'язані з поляризацією діелектрика.

Дослідження залежності електричного заряду від прикладеної напруги дозволяє експериментально визначати ємність електричних систем, аналізувати властивості діелектричних матеріалів і оцінювати ефективність накопичення електричної енергії.

Задача 6

При кімнатній температурі тангенс кута діелектричних втрат ультрафарфору $\operatorname{tg} \delta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$, а при підвищенні температури до 100°C він зростає в два рази. Чому дорівнює $\operatorname{tg} \delta$ цього матеріалу при температурі 200°C ?

У скільки разів збільшиться активна потужність, що виділяється в високочастотному прохідному ізоляторі з цього матеріалу, при зміні

температури від 20 до 200°C? Змінами діелектричної проникності кераміки знехтувати.

Приклад розв'язання задачі 6

Втрати в ультрафарфорі обумовлені наскрізною електропровідністю, тому тангенс кута діелектричних втрат збільшується з температурою по експоненціальному закону:

$$\operatorname{tg} \delta_T = \operatorname{tg} \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)],$$

де $\operatorname{tg} \delta_0$ – значення при $T_0=20^\circ\text{C}$;

α – температурний коефіцієнт $\operatorname{tg} \delta$, який може бути знайдений з виразу

$$\alpha = \frac{\ln \operatorname{tg} \delta_{100} - \ln \operatorname{tg} \delta_0}{100 - 20} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Тоді

$$\operatorname{tg} \delta_{200} = 5 \cdot 10^{-4} \exp[8,66 \cdot 10^{-3}(200 - 20)] = 2,38 \cdot 10^{-3}.$$

Активна потужність P_a , яка виділяється в ізоляторі, росте з температурою пропорційно $\operatorname{tg} \delta$. Тому

$$\frac{P_{a200}}{P_{a0}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{200}}{\operatorname{tg} \delta_0} = \frac{2,38 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,76.$$

Відповідь: $\operatorname{tg} \delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$, $\frac{P_{a200}}{P_{a0}} = 4,76$.

Практичне заняття 7

РОЗРАХУНОК ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ Й ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ. ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПОЛЯРНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Загальні відомості

Діелектрична проникність характеризує здатність матеріалу поляризуватися під дією електричного поля. Вона показує, у скільки разів електрична ємність конденсатора з даним діелектриком більша, ніж ємність такого самого конденсатора у вакуумі. Значення діелектричної проникності залежить від структури речовини, температури, частоти електричного поля та характеру поляризаційних процесів у матеріалі.

Під час роботи електротехнічних пристроїв у діелектриках виникають втрати енергії, пов'язані з процесами поляризації та провідності. Для кількісної оцінки цих втрат використовують тангенс кута діелектричних втрат. Ця величина характеризує відношення активної складової струму до реактивної та показує, яка частина електричної енергії перетворюється в тепло внаслідок внутрішніх процесів у діелектрику.

Величини діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат значною мірою залежать від полярності молекул матеріалу. Полярні діелектрики мають молекули з власним електричним дипольним моментом і характеризуються більш вираженими процесами орієнтаційної поляризації. Неполярні діелектрики, навпаки, не мають постійного дипольного моменту, тому їх поляризація зумовлена переважно електронними та іонними процесами. Це впливає на значення діелектричної проникності та величину діелектричних втрат.

У межах даного практичного заняття виконуються розрахунки діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат для досліджуваних матеріалів. На основі отриманих результатів проводиться порівняльна оцінка їх полярності та аналізуються особливості електричних

властивостей різних діелектричних матеріалів. Отримані результати дозволяють оцінити придатність досліджуваних матеріалів для використання в електротехнічних пристроях.

Задача 7

До діелектрика прямокутної форми розмірами a , b і висотою h докладено постійну напругу $U = 1000$ В. Напруга підводиться до протилежних гранях ab , покритим шарами металу. Відомі розміри діелектрика: $a = 200$ мм, $b = 100$ мм, $h = 2$ мм, питомий об'ємний опір $\rho_v = 2 \cdot 10^{10}$ Ом·м, а питомий поверхневий опір $\rho_s = 8 \cdot 10^{10}$ Ом.

Визначити струм витоку, потужність втрат і питомі діелектричні втрати.

Приклад розв'язання задачі 7

Струм витоку протікає як через обсяг діелектрика, так і по поверхнях чотирьох бічних граней (через дві грані a і через дві грані b). Тому опір між електродами визначається паралельним з'єднанням об'ємного і поверхневого опорів. Об'ємний опір дорівнює:

$$R_v = \rho_v \frac{h}{a \cdot b} = 2 \cdot 10^{10} \frac{2 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 2 \text{ ГОм}.$$

Поверхневий опір дорівнює:

$$R_s = \rho_s \frac{h}{2(a+b)} = 8 \cdot 10^{10} \frac{2 \cdot 10^3}{2(0,2+0,1)} = 0,267 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 0,267 \text{ ГОм}.$$

Повний опір ізоляції дорівнює:

$$R_{iz} = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s} = \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 0,267 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^9 + 0,267 \cdot 10^9} = 0,235 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 0,235 \text{ ГОм}.$$

Струм витоку:

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{iz}} = \frac{1000}{0,235 \cdot 10^9} = 4,25 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 4,25 \text{ мкА}.$$

Потужність втрат

$$P = UI_{\epsilon} = 1000 \cdot 4,25 \cdot 10^{-6} = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 4,25 \text{ мВт}.$$

Питомі діелектричні втрати

$$\Delta P = \frac{P}{V} = \frac{P}{abh} = \frac{4,25 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,002} = 106 \text{ Вт/м}^3.$$

Відповідь: $I_g = 4,25 \text{ мкА}$, $P = 4,25 \text{ мВт}$, $\Delta P = 106 \text{ Вт/м}^3$.

Практичне заняття 8

КРИВІ НАМАГНІЧУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ. АПРОКСИМАЦІЯ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Загальні відомості

Електротехнічні сталі є основними магнітними матеріалами, що використовуються для виготовлення магнітопроводів трансформаторів, електричних машин та інших електромагнітних пристроїв. Їх основне призначення полягає у забезпеченні ефективного проведення магнітного потоку та зменшенні енергетичних втрат під час роботи електротехнічного обладнання. Важливою характеристикою таких матеріалів є залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля, яка описується кривою намагнічування.

Крива намагнічування відображає зміну магнітної індукції в матеріалі залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля. На початковій ділянці крива має майже лінійний характер, що відповідає швидкому зростанню магнітної індукції при збільшенні напруженості поля. У подальшому зі зростанням напруженості магнітного поля процес намагнічування уповільнюється, і матеріал поступово наближається до стану магнітного насичення, коли подальше збільшення напруженості поля майже не призводить до зростання магнітної індукції.

Для аналізу та моделювання роботи трансформаторів і електромагнітних пристроїв часто використовують математичні апроксимації кривої намагнічування. Це пов'язано з тим, що реальна залежність між магнітною індукцією та напруженістю поля має нелінійний характер і її складно безпосередньо використовувати в розрахунках. Апроксимація дозволяє представити криву намагнічування у вигляді аналітичної функції або набору наближених залежностей, що значно спрощує інженерні розрахунки та комп'ютерне моделювання.

Застосування апроксимованих залежностей дає можливість досліджувати режими роботи трансформаторів, оцінювати втрати в магнітопроводі, аналізувати процеси насичення та визначати оптимальні параметри електромагнітних систем. Особливо важливим це є під час розрахунку режимів роботи трансформаторів у перехідних процесах та під час розроблення математичних моделей електроенергетичних установок.

У межах даного практичного заняття розглядаються основні характеристики електротехнічних сталей, аналізується форма кривої намагнічування, а також виконується її апроксимація для магнітопроводу трансформатора. Отримані результати дозволяють дослідити особливості магнітних властивостей матеріалу та оцінити їх вплив на роботу електромагнітних пристроїв.

Задача 8

Виконати апроксимацію кривої намагнічування трансформатора у вигляді залежності $H = a sh (\beta B)$. Криві намагнічування електротехнічних сталей наведені на рис. 8.1. Варіанти кривих намагнічування, що підлягають апроксимації, наведені в табл. 8.1.

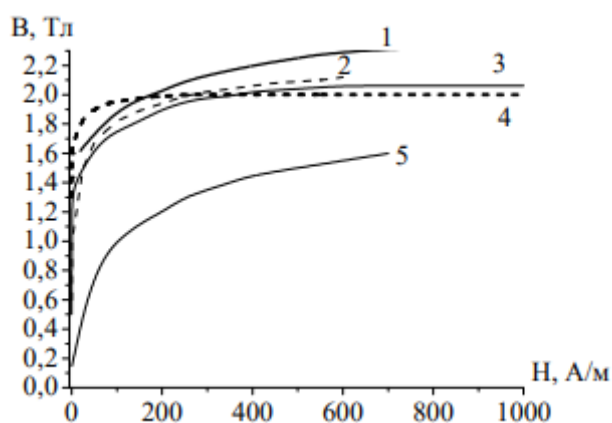


Рисунок 8.1 – Криві намагнічування електротехнічних сталей:

1 – сталь Е; 2 – листова сталь для полюсів;

3 – сталь Е11; 4 – сталь Е330; 5 – чавун

Варіанти кривих намагнічування, що підлягають апроксимації

Параметри	Варіанти і вихідні дані									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крива намагнічування (рис. 8.1)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Послідовність розв'язання

Криву намагнічування трансформатора або дроселя можна апроксимувати залежністю виду $H = \alpha \operatorname{sh}(\beta B)$, де α вимірюється в А/м, а β – в 1/Тл. Ці коефіцієнти визначаються з кривої намагнічування наступним чином.

1. На кривій $H=f(B)$ (рис. 8.1) обирають довільні точки а та б. Їх значення відповідно є H_1 B_1 та H_2 B_2 . Тоді можливо записати ці два рівняння:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \alpha \operatorname{sh}(\beta B_1), \\ H_2 &= \alpha \operatorname{sh}(\beta B_2). \end{aligned} \right\}$$

2. Потім ділять ці рівняння одне на інше і отримують значення m :

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{\operatorname{sh}(\beta B_2)}{\operatorname{sh}(\beta B_1)} = m.$$

3. Задаючись рядом значень β_i , знаходимо співвідношення

$$\frac{\operatorname{sh}(\beta_i B_2)}{\operatorname{sh}(\beta_i B_1)}; \text{ при } i = 1, \dots, n.$$

4. Будуємо залежність

$$\left(\frac{\operatorname{sh}(\beta_i B_2)}{\operatorname{sh}(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i).$$

5. Для значення m , отриманого в п. 2, з даної кривої п. 4 знаходять шукане значення β_m .

6. Скориставшись будь-яким з виразів п. 1, визначають коефіцієнт α , наприклад

$$\alpha = \frac{H_2}{\operatorname{sh}(\beta_m B_2)}.$$

Приклад розв'язання задачі 8

Нехай заданою є крива 5 на рис. 8.1.

1. Обираємо точки а та б: $H_1 = 200$ А/м; $B_1 = 0,925$ Тл; $H_2 = 1000$ А/м; $B_2 = 1,35$ Тл.

$$m = \frac{H_2}{H_1} = \frac{1000}{200} = 5.$$

2. Задаємося п'ятьма значеннями β_1 ; користуючись довідником, обчислюємо гіперболічні синуси відповідних аргументів.

3. Будуємо графік

$$\left(\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i),$$

рис. 8.2, з якого знаходимо шуканий коефіцієнт для значення m (табл. 8.2):

$$\beta_x = \beta_m, 1/\text{Тл}; \beta_x = \beta_m = 4 \text{ (для } m = 5).$$

6. Визначаємо α , А/м:

$$\alpha = \frac{1000}{sh(4 \cdot 1,35)} = 8,2.$$

Таблиця 8.2

β_i	5	4	3	2	1
$\beta_i B_2$	6,75	5,34	4,06	2,7	1,35
$\beta_i B_1$	4,62	3,7	2,78	1,85	0,92
$sh(\beta_i B_2)$	435	122	27	7,45	1,8
$sh(\beta_i B_1)$	49,7	24	7,6	3,1	1,07
$\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)}$	8,76	5,04	3,55	2,33	1,68

Примітка: цифри в таблиці подані орієнтовно.

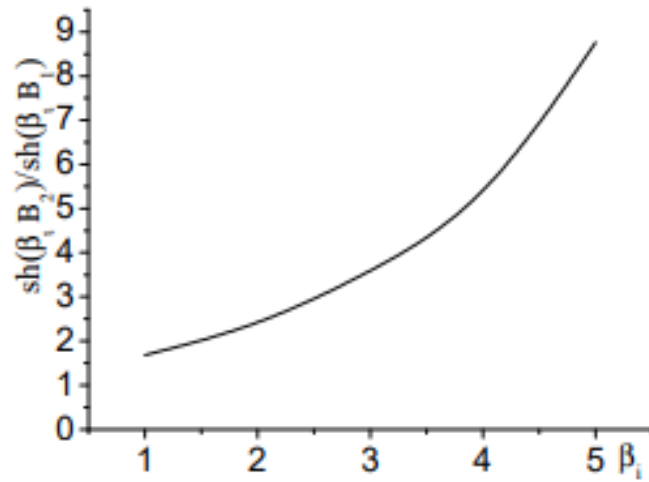


Рисунок 8.2 – Графік $\left(\frac{sh(\beta_i B_2)}{sh(\beta_i B_1)} \right) = f(\beta_i)$

Отримаємо $H = 8,2 sh(4 \cdot B)$.

Примітка: гіперболічний синус можна розрахувати за наведеною формулою:

$$sh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}.$$

Відповідь: графік подано на рис. 8.2

Практичне заняття 9
ВЛАСТИВОСТІ ГРУП МАТЕРІАЛІВ.
РОЗРАХУНОК ДІЮЧОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЗРАЗКІВ ВІД
ДОВЖИНИ ЗРАЗКА, ВВЕДЕНОГО В КОТУШКУ

Загальні відомості

В електротехніці та електромагнетизмі матеріали класифікуються на групи за їхніми магнітними властивостями: діамагнетики, парамагнетики та ферромагнетики. Ці властивості визначають здатність матеріалу реагувати на зовнішнє магнітне поле та впливати на розподіл магнітного потоку у магнітних колах. Для практичного використання важливим параметром є магнітна проникність матеріалу, яка характеризує відношення магнітної індукції в матеріалі до напруженості прикладеного магнітного поля.

Діюча (ефективна) магнітна проникність залежить не лише від властивостей матеріалу, але й від геометричних параметрів зразка, таких як довжина та переріз, а також від умов введення зразка в магнітне коло, наприклад у котушку з певною кількістю витків. Це пояснюється тим, що магнітне коло формує власну напруженість поля, яка визначає розподіл магнітного потоку в зразку, і ефективна проникність враховує вплив країв та розсіювання магнітного поля.

Вимірювання діючої магнітної проникності проводять шляхом введення зразка матеріалу в котушку з відомими параметрами та вимірюванням магнітного потоку або індукції, що виникає під дією відомого струму. На основі виміряних величин та геометрії зразка обчислюють діючу магнітну проникність, яка дозволяє оцінити, наскільки матеріал здатний концентрувати та проводити магнітний потік.

У межах даного практичного заняття виконуються розрахунки діючої магнітної проникності для різних зразків електротехнічних матеріалів залежно від довжини зразка та параметрів котушки. Це дає змогу наочно оцінити вплив геометричних характеристик на магнітні властивості матеріалу та порівняти

магнітні властивості різних груп матеріалів, що використовується у проектуванні та аналізі електромагнітних пристроїв.

Задача 9

У слабких магнітних полях петля гістерезису наближено описується емпіричною формулою Релея:

$$B = \mu_0 \left[(\mu_n + \beta H_m) H \mp \frac{\beta}{2} (H_m^2 - H^2) \right],$$

де знак мінус відповідає інтервалу зростання H , а знак плюс – інтервалу зменшення H . Користуючись цією формулою, необхідно побудувати петлю гістерезису і визначити втрати на гістерезисі в кільцевому магнітному сердечнику з площею поперечного перетину $S = 25 \text{ мм}^2$ і середньою довжиною магнітного контуру $l_{cp} = 50 \text{ мм}$ при впливі на нього змінного магнітного поля частотою 50 Гц і амплітудою $H_m = 20 \text{ А/м}$. Початкова магнітна проникність матеріалу сердечника $\mu_n = 1000$, емпірична постійна $\beta = 200 \text{ м/А}$.

Приклад розв'язання задачі 9

Підстановка вихідних даних в формулу Релея приводить до залежностей: при зростанні H

$$B = 1,26 \cdot 10^{-4} H^2 + 6,3 \cdot 10^{-3} H - 5,03 \cdot 10^{-2},$$

при зменшенні H

$$B = -1,26 \cdot 10^{-4} H^2 + 6,3 \cdot 10^{-3} H + 5,03 \cdot 10^{-2}.$$

Результати розрахунків петлі гістерезису за наведеними формулами показані на рис. 9.1.

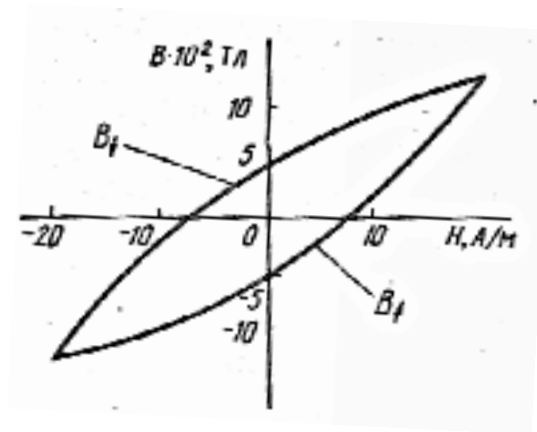


Рисунок 9.1 – Результати розрахунків петлі гістерезису за наведеними формулами

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування, віднесені до одиниці об'єму сердечника, визначаються площею статичної петлі:

$$\frac{W_r}{V} = \oint B dH - \int_{-H_m}^{H_m} (B_{\downarrow} - B_{\uparrow}) dH - \frac{4}{3} \beta \mu_0 H_m^3,$$

де $B_{\downarrow}$ відповідає зменшенню H , $B_{\uparrow}$ зростанню H . На частоті 50 Гц втрати на вихрові струми не грають суттєвої ролі, тому петлю на рис. 9.1 можна розглядати як статичну.

Активна потужність, що виділяється в сердечнику за рахунок втрат на гістерезис при циклічному перемагнічуванні полем частотою 50 Гц

$$P_r = W_r V f = \frac{4}{3} \mu_0 \beta H_m^3 S l_{cp} f = \frac{4}{3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot 20^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = \\ = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 167 \text{ мкВт}.$$

Відповідь: $P_r = 167 \text{ мкВт}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали : короткий довідник. Київ : НУХТ, 2012. 36 с.
2. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підруч. для здобувачів професійної освіти. Київ : Літера ЛТД, 2019. 224 с.
3. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (електротехнічні матеріали): Підручник для вузів. К.: Дельта, 2008. 516 с.
4. Паржницький О.В., Аушева С.В., Шулепіна Г.Ю. Електроматеріалознавство : навч. посібн. для здобувач. проф. освіти. Київ : Грамота, 2023. 224 с.
5. Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник. Львів: Магнолія 2007. 242 с.
6. Леонтьєв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навч. посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 122 с.
7. Сагач М.Ф. Магнітні матеріали: Навчальний посібник з дисципліни «Конструкційні та електротехнічні матеріали». К.: НАУ, 2004. 126 с.
8. Характеристики проводів і кабелів. [Електронний ресурс]. <http://debora.com.ua/dovidniki/>

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

з дисципліни

«ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

(для здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 Електрична інженерія)

(електронне видання)

Укладачі:

Ю. А. РОМАНЧЕНКО

Є. С. РУДНЄВ

М. О. МОРНЕВА

Оригінал-макет *Ю.А. Романченко*

Підписано до друку _____ 2026.

Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. _____. Обл.-вид. арк. ____.

Тираж ____ екз. Вид. № _____. Замов. № _____. Ціна договірна.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля**

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса видавництва: 01042, м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17

адреса електронної пошти uni@snu.edu.ua,

офіційний web-сайт <https://snu.edu.ua>

E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com