

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

методичні рекомендації

для виконання практичних робіт здобувачами першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності G3 «Електрична інженерія» заочної форми
здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 621.3.035

E50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 17.03.2026, протокол № 6.

Укладач:

Віталій Мардзявко – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Микола Кунденко - доктор. тех. наук доцент, завідувач кафедри теплотехніки та ефективних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут

Володимир Мартиненко ».- канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ХІД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	5
2. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ.....	7
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1. Аналіз властивостей провідників в залежності від ступеня провідності.....	10
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2. Електропровідність діелектриків.....	16
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. Діелектричні втрати в діелектриках. Пробій діелектриків.....	21
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. Фізико-механічні та хімічні властивості електротехнічних матеріалів.....	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	32
ДОДАТКИ.....	34

ВСТУП

Методичні рекомендації, що пропонуються, призначені для поетапного освоєння студентами основ електротехнічних матеріалів та формування практичних навичок роботи з ними. Практичні роботи спрямовані на закріплення теоретичних знань про фізико-хімічні, електричні та діелектричні властивості матеріалів, що є необхідною базою для розуміння роботи електротехнічних пристроїв, їх правильного вибору та ефективної експлуатації.

Курс охоплює спектр тем, починаючи з аналізу провідникових матеріалів, вивчення напівпровідників і закінчуючи дослідженням діелектриків. Кожна практична робота допомагає студенту зрозуміти вплив фізичних характеристик матеріалу на його функціональні властивості та ефективність у реальних умовах експлуатації. Особлива увага приділяється процесам поляризації, електропровідності, діелектричних втрат, нагрівання та пробою матеріалів, що дозволяє комплексно оцінити їх поведінку в електричних і магнітних полях.

За допомогою цих методичних рекомендацій студенти навчатимуться:

- закріплювати знання з теми кожної практичної роботи;
- проводити аналіз властивостей різних матеріалів та порівнювати їх за ключовими характеристиками;
- освоювати сучасні методи розрахунку та експериментального визначення електротехнічних властивостей;
- обґрунтовано обирати матеріали для конкретних умов експлуатації електротехнічних пристроїв.

Практичні роботи побудовані таким чином, щоб забезпечити послідовне вивчення матеріалів: від металевих провідників та напівпровідників до діелектриків, із врахуванням їх електричних, теплових, механічних та хімічних характеристик. Ці рекомендації сприятимуть формуванню у студентів системного підходу до оцінки властивостей матеріалів та їх практичного

застосування у сфері електротехніки, що є важливою складовою підготовки висококваліфікованих фахівців.

1. ХІД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАВДАННЯ

1. Ознайомлення з теоретичним матеріалом.

Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з основними поняттями, що вивчаються на відповідній лекції, а також з літературою та матеріалами, які є доступними в межах курсу. Рекомендується перечитати підручники, статті та ресурси, що стосуються теми завдання. Вивчити основні властивості цих матеріалів та їх застосування. Переглянути діаграми, таблиці та схеми, що ілюструють відповідні процеси та параметрів.

2. Ознайомитися зі змістом завдання. Першим етапом виконання завдання є ознайомлення з змістом завдання, підібрати потрібну літературу, визначити усі параметри виконання завдання.

3. Виконання теоретичного завдання. Студент самостійно виконує пошук і аналіз, та дає повні відповіді, на відповідні з темою, питання та при необхідності отримує допомогу викладача.

При виконанні завдання, студент самостійно повинен виконати пошук і аналіз наукової інформації, що стосується теми завдання. Якщо дозволяє час, шукайте наукові статті або технічні звіти, в яких розглядаються новітні магнітні матеріали, особливо для використання в енергетичних технологіях або високоточній електроніці. Використовуйте наукові бази даних (Google Scholar, Scopus, IEEE Xplore) для пошуку актуальних досліджень.

4. Додаткові питання для глибшого розуміння. На основі виконаного завдання підготуйте відповіді на контрольні питання. Це допоможе закріпити отримані знання та ефективно підготуватися до екзамену або тестування.

5. Написання звіту. Після того, як зібрано всю необхідну інформацію, підготуйте звіт. У ньому потрібно відобразити ключові етапи виконання завдання, результати аналізу.

Звіт має бути структурованим: титульний лист, основна частина (теоретичне завдання, завдання на творчість, додаткові питання), висновки. Звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів дослідження. Звід оформлюється відповідно до вимог.

2. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

1. Практична робота пишеться кожним студентом власноруч (одним коляром пасти) та починається з номеру практичної роботи та її найменування. Листи заповнюються лише з однієї сторони.

2. Робота оформлюється на листах А4: полем ліворуч – 2,5 см; полем праворуч – 1 см; полем внизу/верху – 2 см.

3. Кожна сторінка повинна бути пронумерована та підписана відповідним шифром (див. додаток 1.)

3. Звіт з практичної роботи повинен мати: титульний лист, теоретичну частину, практичну та творчу частину, розрахункову частину, відповіді на контрольні питання, висновки.

4. Титульний аркуш є першою сторінкою практичної роботи і містить основні дані про звіт роботи та її автора. Титульний аркуш заповнюється за строго визначеною формою (див. додаток 2) та повинна містити:

- найменування вищого навчального закладу, факультету та кафедри;
- назву практичної роботи;
- допуски до виконання та захисту;
- відведену графу для оцінки студента;
- прізвище, ім'я автора;
- шифр групи в якій навчається автор;
- науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я викладача;
- рік виконання.

Слід пам'ятати, що титульний лист не підлягає нумерації, однак включається до загальної нумерації сторінок практичної роботи.

5. Основна частина практичної роботи повинна виконуватися з урахуванням загальних вимоги до оформлення звіту та оформлюватися у рамці з відповідним шифром (див. додаток 1).

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

Тема: Аналіз властивостей провідників в залежності від ступеня провідності.

Мета роботи: закріпити теоретичні знання про види провідників, фізичні процеси в них та їх класифікацію, а також сформувати навички аналізу властивостей провідникових матеріалів для їх практичного застосування.

1.1. Теоретичні відомості

Провідникові матеріали - це речовини, здатні проводити електричний струм завдяки наявності вільних носіїв заряду. Такими носіями можуть бути електрони, йони або їх комбінації. Ступінь провідності матеріалу визначається його внутрішньою структурою, концентрацією носіїв заряду та умовами експлуатації (температура, тиск, зовнішні поля).

Основною фізичною величиною, що характеризує провідникові властивості матеріалу, є питомий опір. Він визначає здатність матеріалу протидіяти проходженню електричного струму. Чим менший питомий опір, тим кращі провідникові властивості має матеріал. Оберненою величиною є електропровідність.

Зв'язок між опором провідника, його геометричними розмірами та властивостями матеріалу описується формулою:

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

де R - електричний опір, Ом; ρ - питомий опір, Ом·м; l - довжина провідника, м; S - площа поперечного перерізу, м².

Залежно від механізму провідності розрізняють такі основні види провідників:

- Металеві провідники - мають електронну провідність. Вільні електрони переміщуються під дією електричного поля. Приклади: мідь, алюміній, срібло.
- Напівпровідники - характеризуються електронно-дірковою провідністю. Їх провідність залежить від температури та домішок. Приклади: кремній, германій.
- Електроліти - мають йонну провідність. Перенос заряду здійснюється позитивними та негативними йонами в розчинах або розплавах.
- Плазма - провідність забезпечується як електронами, так і йонами.
- Надпровідники - матеріали, які при певних умовах (низьких температурах) мають нульовий електричний опір.

Основні параметри провідників

1. Питомий опір (ρ) - визначає електричні властивості матеріалу.
2. Температурний коефіцієнт опору (α) - показує, як змінюється опір із температурою. Для металів він додатний, тобто при нагріванні опір зростає.
3. Теплопровідність - здатність матеріалу передавати тепло. Важлива для оцінки нагрівання провідників.
4. Щільність - впливає на масу та економічність використання матеріалу.

Залежність опору від температури для більшості металів описується співвідношенням:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T),$$

При проходженні струму через провідник відбувається виділення тепла. Кількість теплоти визначається законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t,$$

а потужність тепловиділення:

$$P = I^2 R,$$

де P - потужність, Вт; I - сила струму, А; R - опір, Ом.

У металів із підвищенням температури зростає інтенсивність теплових коливань атомів, що ускладнює рух електронів, тому опір збільшується. У напівпровідників, навпаки, при нагріванні зростає концентрація носіїв заряду, що призводить до збільшення провідності.

За величиною питомого опору матеріали умовно поділяють на:

- Провідники (метали) — дуже низький питомий опір (10^{-8} Ом·м);
- Напівпровідники — середній (10^{-6} – 10^2 Ом·м);
- Діелектрики — дуже високий (10^8 Ом·м і більше).

Вибір матеріалу залежить від конкретних умов експлуатації:

- мідь застосовується там, де потрібна висока провідність;
- алюміній — коли важлива мала маса;
- ніхром — у нагрівальних елементах через великий опір і термостійкість.

Таким чином, аналіз властивостей провідників дозволяє обґрунтовано обирати матеріали для електротехнічних та енергетичних систем, забезпечуючи їх ефективність, надійність і довговічність.

1.2. Завдання

2.1. Складіть таблицю, у якій порівняйте різні види провідників за такими параметрами:

- Тип провідності (електронна, йонна тощо);
- Основний матеріал або речовина;
- Галузь застосування.

*Приклади заповнення таблиці:

Метали: Мідь, електронна провідність, використання в електромережах.

Напівпровідники: Кремній, електронно-діркова провідність, у виробництві мікросхем.

Таблиця 1.1 – Порівняння видів провідників

Вид провідника	Тип провідності	Основний матеріал / речовина	Галузь застосування

2.2. На основі отриманих знань розв'яжіть задачу:

Задача: У провіднику з міді завдовжки 1 м і поперечним перерізом 1 мм² протікає струм 10 А. Визначте:

- а) опір провідника;
- б) потужність, яка виділяється у вигляді тепла, якщо провідник підключений до джерела напруги 5 В.

Дано:

Питомий опір міді: $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Формули:

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

$$P = I^2 R,$$

2.3. Оберіть чотири провідникові матеріали (наприклад, алюміній та ніхром). Складіть порівняльну характеристику їх властивостей у вигляді таблиці:

- Питомий опір;
- Теплопровідність;
- Температурний коефіцієнт опору;
- Застосування.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика провідникових матеріалів

Матеріал	Питомий опір, Ом·мм ² /м	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Температурний коефіцієнт опору, 1/К	Застосування
----------	--	-------------------------------	--	--------------

Приклад:

Матеріал	Питомий опір, Ом·мм ² /м	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Температурний коефіцієнт опору, 1/К	Застосування
Алюміній	0,028	~237	~0,0043	Лінії електропередач, кабелі, обмотки

2.4. Порівняйте мідь і алюміній за такими параметрами:

- питомий опір;
- щільність;
- теплопровідність;
- галузь використання.

Результати подайте у вигляді таблиці.

2.5. Розрахуйте, яка частина тепла виділиться у провіднику з міді порівняно з алюмінієвим провідником тієї ж довжини і перерізу за однакової сили струму $I = 15$ А.

Дано: $\rho_{\text{мідь}} = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м., $\rho_{\text{алюм}} = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.6. Нагрівальний елемент виготовлений із ніхрому довжиною 5 м і поперечним перерізом 0,5 мм². Визначте опір елемента.

Дано: $\rho_{\text{ніхром}} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Формула:

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

2.7. Обґрунтуйте, чому ніхром є більш ефективним матеріалом для нагрівальних елементів порівняно зі звичайними металами, враховуючи його стійкість до окислення та високий опір.

1.3. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з основним теоретичним матеріалом, що вивчається на відповідній лекції.
2. Ознайомитися та проаналізувати завдання практичної роботи.
3. Підготуйте звіт, де ви повинні виконати:
 - письмові розрахунки та пояснення до кожного пункту завдання;
 - технічні звіти, де буде визначено застосування кожного заходу;
4. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
5. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке провідниковий матеріал і які його основні властивості?
2. Які основні типи провідників використовуються в електротехніці?
3. Наведіть приклади металевих і неметалевих провідників.
4. Які фактори впливають на електропровідність провідників?
5. Чому мідь і алюміній є найпоширенішими провідниками?
6. Як вимірюється ступінь провідності матеріалів?
7. Що таке питомий опір і як він впливає на властивості провідників?
8. Чим відрізняються ідеальні провідники від реальних?
9. Який вплив має температура на провідність металів?

10. Наведіть приклади використання провідників з різними ступенями провідності.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

Тема: Електропровідність діелектриків.

Мета роботи: закріпити знання про явище поляризації в діелектриках, ознайомитися з основними видами поляризації, класифікацією діелектриків і впливом поляризації на діелектричну проникність матеріалів.

2.1. Теоретичні відомості

Поляризація діелектриків - це процес зміщення або впорядкування електричних зарядів у речовині під дією зовнішнього електричного поля, внаслідок чого в матеріалі виникає електричний дипольний момент. Діелектрики, на відміну від провідників, практично не мають вільних носіїв заряду, тому струм у них не протікає, однак вони здатні накопичувати енергію електричного поля.

Основною характеристикою поляризаційних властивостей є вектор поляризації $P^{\vec{}}$, який визначається як дипольний момент одиниці об'єму речовини. Поляризація безпосередньо впливає на діелектричну проникність матеріалу та його поведінку в електричних полях.

Основні види поляризації:

1. Електронна поляризація. Виникає внаслідок зміщення електронної хмари відносно ядра атома. Притаманна всім діелектрикам і проявляється навіть при дуже високих частотах.
2. Іонна поляризація. Характерна для іонних кристалів і обумовлена зміщенням позитивних і негативних йонів у вузлах кристалічної решітки.

3. Дипольна (орієнтаційна) поляризація. Виникає в полярних молекулах, які мають власний дипольний момент. Під дією електричного поля ці диполі орієнтуються вздовж його напрямку.

4. Міжфазна (просторова) поляризація. Зумовлена накопиченням зарядів на межах розділу середовищ із різними електричними властивостями (наприклад, у композитах або неоднорідних матеріалах).

У відсутності зовнішнього поля диполі в матеріалі орієнтовані хаотично, тому сумарний дипольний момент дорівнює нулю. При прикладанні електричного поля відбувається:

- зміщення заряджених частинок;
- або впорядкування вже існуючих диполів.

Це призводить до появи внутрішнього електричного поля, яке частково компенсує зовнішнє.

Кожен вид поляризації характеризується своїм часом встановлення рівноважного стану (часом релаксації):

- електронна - дуже швидка ($\approx 10^{-15}$ с);
- іонна - швидка ($\approx 10^{-13}$ – 10^{-12} с);
- дипольна - значно повільніша (до 10^{-3} с і більше);
- міжфазна - найповільніша (секунди і більше).

Це означає, що не всі механізми поляризації встигають проявлятися при високочастотних електромагнітних полях.

Поляризаційні властивості матеріалів широко використовуються в техніці:

- у конденсаторах - для накопичення електричної енергії;
- у високочастотній техніці - важлива швидкість поляризації;
- у п'єзоелектричних матеріалах - для перетворення механічної енергії в електричну;

- в ізоляційних матеріалах - для забезпечення надійності електроустановок.

Поляризація є ключовим фізичним процесом у діелектриках, що визначає їх електричні властивості. Розуміння механізмів поляризації та їх часових характеристик дозволяє обґрунтовано обирати матеріали для різних галузей електротехніки, електроніки та енергетики.

2.2. Завдання

2.1. Опишіть та побудуйте графік залежності величини поляризації P від напруженості електричного поля E .

2.2. Складіть таблицю, у якій вкажіть вид поляризації, механізм її виникнення та галузь застосування матеріалів із цим видом поляризації. Проаналізуйте, як залежить час встановлення рівноважного стану поляризації від виду поляризації.

Таблиця 2.1 – Види поляризації діелектриків та їх характеристики

Вид поляризації	Механізм виникнення	Галузь застосування
Електронна		
Іонна		
Дипольна (орієнтаційна)		
Міжфазна (маквеллівська)		
Релаксаційна		

2.3. Оберіть три матеріали (наприклад, кварц, вода, кераміка) та визначте, який вид поляризації у них переважає. Поясніть, чому. Наведіть приклади використання цих матеріалів у техніці чи промисловості.

Приклад:

Таблиця 2.2 – Характеристика поляризації вибраних матеріалів

Матеріал	Переважаючий вид поляризації	Пояснення	Галузь застосування
Кварц	Електронна (та частково іонна)	Кварц має кристалічну структуру з міцними ковалентними зв'язками, тому зміщення відбувається переважно на рівні електронних оболонок; відсутні вільні диполі	П'єзоелектричні прилади, генератори частоти, оптичні елементи

2.4. Розрахуйте величину діелектричної проникності газу, якщо відомо, що у зовнішньому полі з напруженістю $E = 1000 \text{ В/м}$ величина поляризації $P = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$.

Формула:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 \cdot E},$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

2.5. Проведіть порівняльний аналіз діелектричної проникності води, кварцу та поліетилену. Побудуйте графік залежності ε_r від частоти зовнішнього поля.

2.6. Розрахуйте струм, що протікає через діелектричну пластину з параметрами:

Товщина $d = 1 \text{ мм}$;

Площа $S = 10 \text{ см}^2$;

Електрична провідність $\sigma = 10^{-12} \text{ См/м}$;

Напруга $U = 100 \text{ В}$.

Формула:

$$I = \sigma \cdot E \cdot S,$$

де $E = \frac{U}{d}$.

2.7. Розрахуйте, як зміниться провідність газу при збільшенні температури вдвічі, якщо середня кількість іонів зростає в 3 рази.

2.8. Побудуйте графік залежності провідності газу від напруженості електричного поля.

2.9. Визначте зміну провідності твердого діелектрика при підвищенні температури з 20°C до 100°C , якщо початкова провідність $\sigma_0 = 10^{-12} \text{ См/м}$, а температурний коефіцієнт $\alpha = 0,02 \text{ К}^{-1}$.

Формула:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha(T-T_0)},$$

2.10. Оцініть, як вплине додавання домішок на провідність кераміки, використовуючи концепцію акцепторних і донорних домішок.

2.3. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з основним теоретичним матеріалом, що вивчається на відповідній лекції.

2. Ознайомитися та проаналізувати завдання практичної роботи.

3. Підготуйте звіт, де ви повинні виконати:

- письмові розрахунки та пояснення до кожного пункту завдання;

- технічні звіти, де буде визначено застосування кожного заходу;

4. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.

5. Зробити висновок про виконану роботу.

2.4. Контрольні питання

1. Що таке поляризація діелектриків?
2. Як визначається діелектрична проникність матеріалів?
3. Які види поляризації діелектриків існують?
4. Як частота електричного поля впливає на поляризацію діелектриків?
5. У яких галузях використовуються діелектрики з високою діелектричною проникністю?
6. Що таке електропровідність діелектриків?
7. Як впливає структура діелектриків на їхню провідність?
8. Які фактори спричиняють підвищення провідності діелектриків?
9. Чим відрізняється електропровідність діелектриків від провідників і напівпровідників?
10. Де використовуються діелектрики з низькою електропровідністю?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

Тема: Діелектричні втрати в діелектриках. Пробій діелектриків.

Мета роботи: вивчити природу діелектричних втрат у різних матеріалах, розглянути їхні види та залежність від фізичних параметрів, а також оцінити вплив втрат на експлуатаційні характеристики діелектриків.

3.1. Теоретичні відомості

Діелектричні матеріали, перебуваючи в змінному електричному полі, не лише накопичують енергію, але й частково її втрачають. Ці втрати називаються діелектричними втратами і проявляються у вигляді тепловиділення в матеріалі. Вони обумовлені недосконалістю діелектрика та внутрішніми фізичними процесами, що супроводжують поляризацію і провідність.

Основними причинами діелектричних втрат є:

- наявність залишкової електропровідності;
- запізнювання поляризації відносно змінного електричного поля;
- внутрішні структурні неоднорідності матеріалу.

Кількісно втрати характеризуються кутом діелектричних втрат δ або його тангенсом $\tan \delta$, який показує співвідношення між активною (втратною) і реактивною складовими струму.

Потужність діелектричних втрат визначається за формулою:

$$P = U^2 \omega C \tan \delta$$

де U - напруга, В; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, рад/с; C - ємність, Ф; $\tan \delta$ - коефіцієнт діелектричних втрат.

Види діелектричних втрат

1. Провідникові (омічні). Пов'язані з наявністю вільних носіїв заряду (електронів або йонів), що спричиняють протікання струму.
2. Поляризаційні (релаксаційні). Виникають через запізнювання процесу орієнтації диполів у змінному полі.
3. Іонні та електронні втрати. Обумовлені зміщенням заряджених частинок у кристалічній решітці.
4. Міжфазні втрати. Виникають у неоднорідних матеріалах через накопичення зарядів на межах фаз.

Діелектричні втрати суттєво залежать від частоти прикладеного поля:

- при низьких частотах переважають провідникові втрати;
- при середніх частотах - поляризаційні;
- при високих частотах - електронні та іонні.

У полярних діелектриках (наприклад, рідинах) спостерігається максимум втрат при певній частоті, що відповідає резонансу релаксаційних процесів.

На величину діелектричних втрат впливають:

- температура (з підвищенням температури втрати зростають);
- вологість (збільшує провідникову складову);
- структура матеріалу (дефекти, домішки);
- напруженість електричного поля.

Пробій діелектрика - це різке зростання провідності матеріалу під дією сильного електричного поля, що призводить до втрати ізоляційних властивостей.

Критична напруженість електричного поля визначається як:

$$E_{кр} = \frac{U_{проб}}{d}$$

де $U_{проб}$ - пробивна напруга; d - товщина діелектрика.

Види пробою

1. Електричний пробій. Виникає при досягненні критичної напруженості поля.
2. Тепловий пробій. Обумовлений перегрівом матеріалу через втрати.
3. Електрохімічний пробій. Викликаний хімічними змінами в матеріалі під дією струму.
4. Іонізаційний пробій (у газах). Пов'язаний із розвитком електронної лавини.

Електрична міцність - це здатність матеріалу витримувати електричне поле без пробою. Вона залежить від:

- товщини матеріалу;
- температури;
- частоти;
- стану поверхні;
- наявності дефектів.

Діелектричні втрати визначають ефективність роботи електротехнічних пристроїв:

- у трансформаторах і кабелях вони призводять до нагрівання;
- у високочастотній техніці впливають на стабільність роботи;
- у конденсаторах визначають їх ККД.

Пробій діелектриків є критичним явищем, що може призвести до аварій, тому при проектуванні електрообладнання важливо враховувати запас електричної міцності.

Діелектричні втрати та пробій є ключовими характеристиками діелектриків, що визначають їх надійність і довговічність. Розуміння механізмів втрат і умов пробою дозволяє правильно обирати матеріали та забезпечувати безпечну експлуатацію електротехнічних систем.

3.2. Завдання

3.1. Розрахуйте значення діелектричних втрат для матеріалу, якщо:

-Коефіцієнт втрат $\tan \delta = 0,02$;

-Частота сигналу $f = 50$ Гц;

-Ємність $C = 10$ мкФ;

-Напруга $U = 220$ В.

Формула для потужності втрат:

$$P = \omega C U^2 \tan \delta ,$$

де $\omega = 2\pi f$.

3.2. Складіть таблицю, що порівнює види діелектричних втрат за основними характеристиками (механізм, матеріали, частотний діапазон).

Таблиця 3.1 – Порівняння видів діелектричних втрат

Вид діелектричних втрат	Механізм виникнення	Типові матеріали	Частотний діапазон

Приклад:

Вид діелектричних втрат	Механізм виникнення	Типові матеріали	Частотний діапазон
Провідникові (омічні)	Наявність вільних носіїв заряду, що викликає протікання струму та виділення тепла	Діелектрики з домішками, волога ізоляція	Низькі частоти (до 10^3 Гц)

3.3. Проаналізуйте, як зміна частоти зовнішнього поля впливає на поляризаційні втрати в рідкому діелектрику.

3.4. Побудуйте графік залежності коефіцієнта втрат $\tan \delta$ у газах від напруженості поля при різних температурах.

3.5. Проведіть розрахунок потужності втрат у газі з ємністю $C=5$ пФ, якщо $\tan \delta=0,001$, частота $f=1$ МГц, а напруга $U=103$ В.

3.6. Побудуйте графік залежності потужності втрат від температури для рідкого діелектрика.

3.7. Виконайте розрахунок потужності втрат для твердого діелектрика, якщо: $\tan \delta = 0,005$; $f=10$ кГц; $C =50$ нФ; $U =100$ В.

3.8. Побудуйте графік залежності коефіцієнта втрат $\tan \delta$ від частоти для керамічного ізолятора.

3.9. Проведіть розрахунок критичної напруженості електричного поля для діелектрика, якщо товщина ізоляції $d=0,5$ мм, а пробивна напруга $U_{проб}=2$ кВ.

Формула:

$$E_{кр} = \frac{U_{проб}}{d},$$

3.10. Побудуйте графік залежності пробивної напруги від товщини діелектрика.

3.11. Виконайте розрахунок пробивної напруги для газу, якщо: напруженість пробою $E_{кр}=30$ кВ/см; відстань між електродами $d=1$ см.

Формула:

$$U_{проб} = E_{кр} \cdot d ,$$

3.12. Побудуйте графік залежності пробивної напруги від тиску для повітря при температурі 20°C.

3.13. Проведіть розрахунок пробивної напруги для рідкого діелектрика, якщо його пробивна напруженість $E_{кр} = 15$ кВ/мм, а товщина шару $d = 2$ мм.

Формула: ($U_{проб}$).

3.14. Побудуйте графік залежності пробивної напруги від температури в межах 10°C до 80°C (моделюйте дані).

3.15. Проведіть розрахунок напруженості пробою для твердого діелектрика, якщо пробивна напруга $U_{проб} = 10$ кВ, а товщина шару $d = 1$ мм.

Формула ($E_{кр}$).

3.3 Вказівки щодо оформлення звіту

1. Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з основним теоретичним матеріалом, що вивчається на відповідній лекції.

2. Ознайомитися та проаналізувати завдання практичної роботи.

3. Підготуйте звіт, де ви повинні виконати:

- письмові розрахунки та пояснення до кожного пункту завдання;

- технічні звіти, де буде визначено застосування кожного заходу;

4. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.

5. Зробити висновок про виконану роботу.

3.4. Контрольні питання

1. Що таке діелектричні втрати?
2. Як вони пов'язані з електричним полем і частотою?
3. Які фактори впливають на рівень діелектричних втрат?
4. Як діелектричні втрати впливають на роботу електротехнічного обладнання?
5. Які матеріали використовуються для зменшення діелектричних втрат?
6. Що таке пробій діелектриків і за яких умов він виникає?
7. Які види пробою існують?
8. Як електричне поле впливає на механізм пробою?
9. Які фактори визначають електричну міцність діелектриків?
10. Як запобігти пробою діелектриків у практичному застосуванні?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

Тема: Фізико-механічні та хімічні властивості електротехнічних матеріалів.

Мета роботи: вивчити фізико-механічні, теплові, хімічні та радіаційні властивості електротехнічних матеріалів, оцінити їхню стійкість до зовнішніх впливів і дослідити вплив різних факторів на їхню поведінку в умовах експлуатації.

4.1. Теоретичне завдання

Діелектричні матеріали широко застосовуються в електротехніці завдяки своїм електричним та фізико-механічним властивостям, що визначають надійність, довговічність і ефективність їх використання. Основними електричними характеристиками є діелектрична проникність, питомий опір, електрична міцність та діелектричні втрати. Діелектрична проникність

характеризує здатність матеріалу накопичувати електричну енергію, питомий опір визначає електроізоляційні властивості, а електрична міцність показує здатність витримувати електричне поле без пробою. Діелектричні втрати ($\tan \delta$) визначають енергетичні втрати матеріалу під дією змінного електричного поля. Теплові властивості, такі як теплопровідність і теплостійкість, визначають здатність матеріалу відводити тепло та витримувати високі температури; перегрів може призвести до старіння та деградації діелектрика. Механічні властивості — міцність, твердість, еластичність та крихкість — визначають поведінку матеріалу під навантаженням і впливають на його довговічність. Міцність визначається як добуток межі міцності на площу перерізу, а температура нагрівання матеріалу при протіканні струму залежить від питомого опору, густини струму та коефіцієнта тепловіддачі. Вологопоглинання значно впливає на електричні характеристики, зменшуючи питомий опір, підвищуючи втрати та змінюючи діелектричну проникність, що можна оцінити за формулою

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + kW),$$

де W - вологопоглинання, а k - коефіцієнт впливу вологи.

Хімічна стійкість матеріалу забезпечує захист від окислення, вологи та агресивних середовищ, що особливо важливо для полімерів, епоксидних смол, слюди та фторопластів. Електричні, теплові та механічні властивості матеріалу взаємопов'язані: підвищення температури знижує електричну міцність, дефекти можуть викликати локальні пробої, а волога погіршує всі ключові характеристики. Комплексний аналіз фізико-механічних властивостей діелектриків дозволяє оцінити їх поведінку в реальних умовах, забезпечити ефективну ізоляцію, знизити енергетичні втрати та підвищити термін служби електротехнічного обладнання.

4.2. Завдання

4.1. Наведіть приклади матеріалів з різними фізико-механічними властивостями та опишіть їх застосування (наприклад, епоксидна смола, слюда, фторопласт).

4.2. Створіть таблицю, яка порівнює основні властивості трьох популярних діелектриків.

Таблиця 4.1 – Порівняння властивостей діелектричних матеріалів

Властивість	Скло	Поліетилен	Кераміка
-------------	------	------------	----------

Приклад:

Властивість	Скло	Поліетилен	Кераміка
Діелектрична проникність (ϵ)	4–10	2,2–2,4	6–1200 (залежить від типу)
Питомий опір, Ом·м	$\sim 10^{10}–10^{14}$	$\sim 10^{13}–10^{16}$	$\sim 10^8–10^{13}$

4.3. Проведіть розрахунки зміни діелектричної проникності матеріалу (полімерних діелектриків), якщо його вологопоглинання становить 2% за масою.

Формула:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + k \cdot W),$$

де ϵ_0 - діелектрична проникність матеріалу без вологи; W - вологопоглинання (у частках від 1, тобто 2% = 0,02); k - коефіцієнт впливу вологи на діелектричну проникність (визначається експериментально, наприклад, $k = 10$ для деяких полімерів).

4.4. Побудуйте графік залежності електричної міцності матеріалу від вмісту вологи.

4.5. Розрахуйте температуру нагрівання матеріалу при тривалому протіканні струму, якщо питомий опір $\rho = 109 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, густина струму $j = 0,01 \text{ А/мм}^2$, а коефіцієнт тепловіддачі $h = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Формула:

$$T = \frac{\rho \cdot j^2}{h},$$

де T - температура нагрівання (виражається відносно температури навколишнього середовища); ρ - питомий опір матеріалу, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; j - густина струму, А/мм^2 ; h - коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

4.6. Побудуйте графік залежності теплопровідності від температури для діелектрика (зmodelюйте дані).

4.7. Розрахуйте механічне навантаження, яке витримує ізоляційний шар із матеріалу з межею міцності $\sigma_m = 100 \text{ МПа}$, якщо площа перерізу $A = 10 \text{ мм}^2$.

$$F = \sigma_m \cdot A,$$

де F - максимальне механічне навантаження, Н; σ_m - межа міцності матеріалу, Па ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$); A - площа перерізу, м^2 ($10 \text{ мм}^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$).

4.8. Побудуйте графік залежності твердості матеріалу від температури для полімерних діелектриків.

4.3. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з основним теоретичним матеріалом, що вивчається на відповідній лекції.

2. Ознайомитися та проаналізувати завдання практичної роботи.

3. Підготуйте звіт, де ви повинні виконати:

- письмові розрахунки та пояснення до кожного пункту завдання;
- технічні звіти, де буде визначено застосування кожного заходу;

4. Оформити звіт відповідно до вимоги захисту та виконання практичних робіт.

5. Зробити висновок про виконану роботу.

4.4. Контрольні питання

1. Які фізико-механічні властивості важливі для електротехнічних матеріалів?

2. Як хімічна стійкість впливає на довговічність матеріалів?

3. Чому важливі теплові характеристики матеріалів для їх використання в електротехніці?

4. Як оцінюють зносостійкість електротехнічних матеріалів?

5. Наведіть приклади матеріалів з оптимальними фізико-механічними властивостями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна

1. Конструкційні матеріали і технології : навчальний посібник / Р. В. Будяк, Е. К. Посвятенко, Л. В. Швець, Г. А. Жученко. Вінниця : ФОП Т. П. Барановська, 2020. 240 с. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/25442.pdf>.

2. Електротехнічні матеріали. Частина 1. Діелектричні матеріали : курс лекцій / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. М. Кириленко, К. В. Кириленко. В. М. Головка. Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2021. 224 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8d0ebb78-3e8f-4e4a-98ef-dfb18ff2573d/content>.

3. Щерба А. А., Поворознюк Н. І. Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси. Вступ до спеціальності : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 497 с.

4. Трегуб М. І., Рубець А. М., Хахула В. С. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Біла Церква : БНАУ, 2020. 60 с. URL: <https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/5501/3/elektrotehnicni%20materialy.pdf>.

5. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посібник. Львів : Магнолія, 2025. 241 с.

6. Паржницький О. В., Аушева С. В., Шулепіна Г. Ю. Електроматеріалознавство : навч. посібн. для здобувач. проф. освіти. Київ : Грамота, 2023. 224 с. URL: https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/posibnyky-prof-tech/Elektromaterialoznavstvo_27_01_2023_compressed.pdf.

Допоміжна

1. Stability of self-consistent states of flow in a short-circuited diode in a mode with a through passage of particles / V. Mardziavko та ін. *IEEE fifth international*

conference on information and telecommunication technologies and radio electronics, м. Київ, 2 груд. 2021 р. Київ, 2021. С. 275–278.

2. Основи слюсарної справи : навч. посібник / А. Ф. Попов, Т. В. Пахар, О. В. Паржницький, Г. Ю. Шулепіна. Чернівці : Букрек, 2020. 224 с. URL: <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidruchnyku-posibnyku-profosvita/slusarna-sprava-Popov.pdf>.

Електронні ресурси

1. ДСТУ 2183-93. Картон електроізоляційний. Методи визначення електричної міцності і стійкості до впливу випробної напруги (ГОСТ 12268.2-93). Чинний від 1993-02-17. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1993. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93688.

2. ДСТУ 2267-93. Вироби електротехнічні. Терміни та визначення. Чинний від 1993-11-12. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1993. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60389.

3. ДСТУ ІЕС 60216-1:2015. Матеріали електроізоляційні. Характеристики нагрівостійкості. Частина 1. Методики проведення випробування на старіння й оцінювання результатів (ІЕС 60216-1:2001, IDT). Чинний від 2016-09-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

4. Електроматеріали. Пасивні елементи засобів радіозв'язку та захисту інформації : навч. посібник / С. В. Толюпа та ін. Київ : ДУТ, 2015. 193 с. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/1_1243_86357886.pdf.

5. ПУЕ Правила улаштування електроустановок. Київ, 2015. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758.

ДОДАТКИ

Додаток 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ЗВІТ

до практичної роботи з дисципліни
“Електротехнічні матеріали”
на тему: “Діелектрична проникність”

Допуск до виконання _____

Допуск до захисту _____

Захист _____

Виконав студент групи: Ен 1/1 _____
(підпис)

Олексій ХАРІТОНОВ
(імя, прізвище)

Керівник: _____
(підпис)

Віталій МАРДЗЯВКО
(імя, прізвище)

2026

					141. 3 Ен 2/1.01.ПР01.Ел.тех.мат.	Лист
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні рекомендації

Укладачі: **Мардзявко** Віталій Анатолійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,8.
Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.