

Практична робота №1

Дослідження енергетичного обладнання (огляд)

Мета роботи: сформувати первинне уявлення про основне енергетичне обладнання; ознайомити студентів із конструкцією та принципом роботи енергетичних установок; навчити визначати функціональне призначення обладнання; сформувати базові навички технічного аналізу.

Обладнання та матеріали

1. Лабораторні стенди з енергетичним обладнанням.
2. Лабораторні установки випускової кафедри.

Короткі теоретичні відомості

Основні групи енергетичного обладнання

1. Генеруюче обладнання
2. Трансформаторне обладнання
3. Комутаційні апарати
4. Розподільчі пристрої
5. Захисне та вимірювальне обладнання

Генератори

- Перетворюють механічну енергію в електричну.
- Основний тип — синхронний генератор.
- Основні параметри: потужність (МВт), напруга (кВ), частота (50 Гц).

Силкові трансформатори

- Змінюють рівень напруги.
- Основні параметри: потужність (МВА), коефіцієнт трансформації, напруга КЗ.

Комутаційні апарати, забезпечують керування режимами роботи електроустановок, локалізацію аварій та безпечну експлуатацію обладнання:

- Вимикачі (відключають струми навантаження та КЗ)

Тип	Діапазон напруг	Особливості
Вакуумний	6–35 кВ	Компактний, малий знос
Елегазовий (SF ₆)	110–750 кВ	Висока надійність
Повітряний	До 110 кВ	Застарілий тип

При розмиканні контактів виникає електрична дуга. Гасіння дуги відбувається: у вакуумі — швидке відновлення ізоляції; в елегазі — висока діелектрична міцність SF₆.

- Роз'єднувачі (створюють видимий розрив). Не призначені для вимикання струмів навантаження.

- Заземлювачі (забезпечують безпеку). Типи: стаціонарні; вбудовані в роз'єднувач; переносні.

Розподільчі пристрої (РУ) — це комплекс обладнання для приймання та розподілу електроенергії:

- Відкриті (ВРП)
- Закриті (ЗРУ)
- Елегазові (GIS)

Порядок виконання

1. Інструктаж з безпеки. Перед початком роботи студент: ознайомлюється з правилами електробезпеки; працює лише з демонстраційним або знеструмленим обладнанням; виконує вказівки викладача.

2. Ознайомлення з обладнанням.

3. Визначити тип РУ за фото. Пояснити різницю між ВРП і ЗРУ. Визначити клас напруги за габаритами ізоляції.

4. Визначити до якої групи належить обладнання:

Генеруюче

Трансформаторне

Комутаційне

Захисне

Вимірювальне

5. Аналіз технічних параметрів

Параметр	Значення
Номінальна напруга	
Номінальна потужність / струм	
Частота	
Тип ізоляції	
Тип охолодження	
Виробник	

6. Визначення місця обладнання в структурі станції. На підставі однолінійної схеми студент:

Позначає місце встановлення обладнання.

Визначає, з якими елементами воно з'єднане.

Пояснює, що станеться при його відмові.

7. Оцінка безпеки. Необхідно визначити:

- Потенційні небезпеки: ураження струмом; дуговий розряд; перегрів; перенапруга.

- Необхідні заходи безпеки: заземлення; блокування; попереджувальні плакати; засоби індивідуального захисту.

Контрольні питання

1. Що таке електрична станція? Яке основне призначення підстанції?
2. У чому полягає функція синхронного генератора?
3. Для чого призначений силовий трансформатор?
4. Чим відрізняється трансформатор від автотрансформатора?
5. Яке призначення вимикача? Чим відрізняється вимикач від роз'єднувача?
6. Для чого застосовується заземлення?
7. Що таке розподільчий пристрій?

Практична робота №2

Класифікація матеріалів та критерії вибору

Мета роботи: навчитися визначати групу матеріалу та обирати матеріал для вузла виробу за експлуатаційними вимогами.

Обладнання та матеріали

3. Довідник властивостей матеріалів
4. Завдання з переліком вузлів виробу

Короткі теоретичні відомості

Матеріали, що застосовуються в електротехнічних і приладобудівних виробках, доцільно класифікувати за їхнім функціональним призначенням і доміантними фізико-хімічними властивостями на провідникові, ізоляційні (діелектричні), магнітні та конструкційні. Провідникові матеріали характеризуються високою електропровідністю та малою питомою електричною опірністю, тому використовуються для струмопровідних елементів (провідники, шини, контакти, доріжки друкованих плат). До цієї групи належать метали та їхні сплави (мідь, алюміній, латунь), а також спеціальні матеріали для контактів і резистивних елементів, де важливими стають стабільність опору, корозійна стійкість і зносостійкість. Ізоляційні матеріали, навпаки, мають високий питомий опір, достатню електричну міцність та низькі діелектричні втрати; їх застосовують для електричної ізоляції, розділення струмопровідних частин, виготовлення корпусних і заливних елементів. Діелектрики можуть бути твердими (кераміка, скло, полімери), рідкими (ізоляційні оливи) або газоподібними (повітря, інертні гази), а вибір конкретного типу визначається напругою, частотою, температурним режимом і умовами навколишнього середовища. Магнітні матеріали призначені для формування, підсилення або екранування магнітного поля в електромагнітних вузлах (осердя трансформаторів, дроселів, електродвигунів, магнітопроводів). Їхні

ключові характеристики пов'язані з магнітною проникністю, коерцитивною силою, питомими втратами на гістерезис і вихрові струми; залежно від призначення розрізняють м'якомагнітні матеріали (для змінних полів і мінімізації втрат) та твердомагнітні матеріали (для постійних магнітів і збереження намагніченості). Конструкційні матеріали забезпечують механічну цілісність, геометричну стабільність і ресурс виробу, тому для них визначальними є міцність, жорсткість, ударна в'язкість, зносо- та корозійна стійкість, а також масогабаритні обмеження. У практиці використовують сталі, алюмінієві сплави, полімери, композити тощо.

Вибір матеріалу для конкретного вузла виробу здійснюють на основі сукупності експлуатаційних вимог і критеріїв, що відображають умови роботи та очікуваний рівень надійності. До електричних критеріїв належать електропровідність або питомий опір (залежно від функції елемента), електрична міцність, діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат, контактний опір і його стабільність у часі, електрична дугостійкість, стійкість до електрохімічної корозії. Теплові критерії охоплюють теплопровідність, теплоємність, робочий температурний діапазон, температурні коефіцієнти параметрів (наприклад, опору), термостійкість, теплове старіння, а також узгодженість коефіцієнтів теплового розширення в з'єднаних деталях для запобігання термонапруженням і розшаруванню. Механічні критерії включають границю міцності й текучості, твердість, втомну міцність, опір повзучості, зносостійкість, ударну в'язкість, а також вібростійкість і стабільність розмірів за навантажень. Технологічні критерії визначають придатність матеріалу до обраних способів виготовлення та складання: оброблюваність різанням, литтєвість, штампованість, зварюваність/паяність, адгезію покриттів і компаундів, сумісність із полімеризацією, можливість термообробки, ремонтпридатність, доступність стандартних напівфабрикатів і повторюваність властивостей у серійному виробництві. На практиці також враховують економічні та екологічні чинники

(вартість, дефіцитність, маса, токсичність, утилізація), а для відповідальних виробів – відповідність стандартам і регламентам.

Щоб обґрунтовано порівняти кілька кандидатних матеріалів за різнотипними показниками, доцільно застосовувати матричні методи багатокритеріального вибору з ваговими коефіцієнтами. Сутність підходу полягає в тому, що для заданого вузла формують перелік критеріїв, встановлюють їхню відносну важливість (ваги) відповідно до реальних умов експлуатації (наприклад, для високовольтної ізоляції пріоритетною є електрична міцність, а для теплообмінного елемента – теплопровідність), після чого кожному матеріалу надають нормовані оцінки за кожним критерієм за даними довідників або експерименту. Підсумковий інтегральний бал отримують як зважену суму оцінок. Матеріал з найбільшим значенням розглядають як найбільш придатний за прийнятою моделлю. Така процедура підвищує прозорість прийняття рішення, дає змогу кількісно врахувати компроміси між властивостями та зменшує ризик суб'єктивного вибору, особливо коли матеріал має одночасно забезпечувати електричну надійність, теплову стабільність, механічну міцність і технологічність виготовлення.

Порядок виконання

1. Визначити умови роботи кожного вузла (U , I , T , середовище).
2. Запропонувати 2 альтернативи матеріалу та порівняти.
3. Заповнити матрицю вибору і обрати оптимальний варіант.
4. Сформулювати висновок.

Порядок виконання роботи слід розпочати з аналізу призначення кожного вузла виробу та фіксації його експлуатаційних умов, оскільки саме вони визначають перелік критичних властивостей матеріалу. Для кожного вузла необхідно встановити робочі електричні параметри: напругу U (номінальну та, за можливості, максимальну), струм I (сталий і пусковий/піковий), а також теплові умови роботи

T – температуру навколишнього середовища й очікуваний самонагрів від втрат потужності. Додатково описують характер середовища експлуатації: вологість, наявність пилу, агресивних газів або бризок, можливість корозії, вібраційні навантаження, термоциклування, вплив ультрафіолету, а також обмеження, пов'язані з масою, габаритами та технологією виготовлення. Джерелом цих даних є умова завдання, електрична схема/опис виробу або технічні характеристики; якщо окремі параметри не задані, допускається їх обґрунтоване прийняття з обов'язковим зазначенням прийнятих припущень у роботі.

На основі встановлених умов формулюють вимоги до матеріалу вузла, які доцільно подавати у прикладному вигляді: для провідникових елементів – достатня електропровідність, допустимий нагрів і можливість надійного з'єднання (пайка/зварювання/обтиск), для ізоляційних деталей – електрична міцність, питомий опір, низьке водопоглинання та термостійкість, для конструкційних частин – міцність, жорсткість, ударна в'язкість, зносо- й корозійна стійкість, для магнітних вузлів – магнітна проникність, низькі питомі втрати та стабільність характеристик у заданому температурному діапазоні. Далі для кожного вузла пропонують дві альтернативи матеріалу (Альт. 1 і Альт. 2), які повинні бути реалістичними з точки зору застосування та належати до відповідної групи матеріалів. Підбір альтернатив виконують за довідником властивостей матеріалів, де для кожної альтернативи відбирають ключові параметри, що безпосередньо пов'язані з вимогами вузла. Якщо довідник наводить інтервали значень, слід використовувати типові або граничні значення відповідно до логіки надійності (наприклад, для електричної міцності доцільно враховувати найменше допустиме значення, для міцності – значення з урахуванням запасу). Попереднє порівняння альтернатив виконують якісно (переваги/недоліки за основними властивостями) та готують основу для подальшого кількісного оцінювання.

Після цього здійснюють основний етап – заповнення матриці вибору та визначення оптимального матеріалу за методом зваженої суми. Для конкретного

вузла формують перелік критеріїв оцінювання, який повинен відображати експлуатаційні вимоги: електричний критерій (провідність/опір, електрична міцність, стабільність параметрів), тепловий критерій (теплопровідність, термостійкість, допустима робоча температура, теплове старіння), механічний критерій (міцність, твердість, втомна стійкість, знос), критерій стійкості до середовища (корозія, волога, хімічна стійкість) і технологічний критерій (паяність, зварюваність, оброблюваність, формування, доступність стандартних напівфабрикатів). За потреби додають економічний критерій (вартість/доступність). Кожному критерію надають ваговий коефіцієнт ω_i , що відображає його відносну важливість саме для цього вузла; ваги задають так, щоб їх сума дорівнювала 1 (або 100%), а їхній розподіл обґрунтовують умовами роботи (наприклад, за високої вологості збільшують вагу корозійної стійкості, за значних струмів – вагу електричних і теплових характеристик). Далі для кожної альтернативи за кожним критерієм виставляють оцінку r_i за шкалою 1–5, де 5 відповідає найкращій відповідності вимозі та наявності запасу, 3 – мінімально прийнятному рівню, 1 – невідповідності; оцінки мають спиратися на довідникові дані та логіку впливу властивості на працездатність вузла (тобто оцінювання повинно бути аргументованим, а не формальним). Розрахунок підсумкового показника виконують як зважену суму $S = \sum \omega_i r_i$ окремо для Альт. 1 та Альт. 2; оптимальним вважають варіант із більшим значенням S , а різницю між сумами інтерпретують як ступінь переваги одного матеріалу над іншим. Отримані результати подають у робочій таблиці у форматі: «Вузол – Вимоги – Альт. 1 – Альт. 2 – Обрано/пояснення», де у графі «Вимоги» коротко фіксують U, I, T і середовище та 2–4 головні вимоги, у графах альтернатив зазначають назву матеріалу (за потреби – клас/марку) і ключові властивості або технологічні особливості, а в графі «Обрано/пояснення» наводять вибір із посиланням на підсумкові бали (наприклад, «обрано Альт. 1, оскільки $S_1 > S_2$. Якщо обраний матеріал має критичний недолік (наприклад, гірша корозійна стійкість або складніша технологія), у поясненні

доцільно вказати можливий інженерний захід, що забезпечує виконання вимог (захисне покриття, герметизація, збільшення перерізу, вибір іншого способу з'єднання тощо).

Висновок повинен узагальнювати виконану процедуру та демонструвати логічний зв'язок між умовами експлуатації, критеріями оцінювання і остаточним вибором. У висновку стисло зазначають, що для кожного вузла визначено умови роботи (за параметрами U , I , T і характеристиками середовища), підібрано дві альтернативи матеріалу за довідниковими даними, виконано багатокритеріальне оцінювання за шкалою 1–5 із ваговими коефіцієнтами та обрано матеріал за максимальним значенням зваженої суми. Далі наводять перелік «вузол → обраний матеріал» і підкреслюють 1–2 визначальні критерії для найважливіших вузлів (наприклад, «для ізоляції вирішальними були електрична міцність і водопоглинання; для провідника – електропровідність і тепловий режим»), а також коротко фіксують, які компроміси прийнято та чому вони є допустимими з позицій експлуатаційної надійності й технологічності.

Приклад виконання роботи

Розглядається **електронний модуль керування 24 В DC** для роботи в приміщенні: напруга живлення $U=24В$, струм навантаження до $I=10А$, (тривалий режим), температура довкілля $T_{amb} = 20 \dots 40^{\circ}C$, температура вузлів через самонагрів до $T_{work} = 70 \dots 90^{\circ}C$, середовище – помірна вологість (до $\sim 80\%$ без конденсації), пил слабкий, можливі невеликі вібрації.

Підсумкова таблиця

Вузол	Вимоги (U, I, T, середовище)	Альт. 1	Альт. 2	Обрано/пояснення
1. Струмopрoвіднa шина/пpоvідник живлення (вхід 24 В, 10 А)	$U = 24В, I \leq 10А, T \leq 70^{\circ}C$; вологість помірна. Потрібні: мала (R), малий нагрів, корозійна стійкість, добра паяність	Мідь (Cu)	Алюміній (Al)	Сu: $S_{Cu} = 4.30 > S_{Al} = 3.80$ Вища провідність і паяність → менші втрати та надійні контакти
2. Електроізолююча теплопровідна прокладка між MOSFET і радіатором	Електроізоляція до ~100 В (з запасом), T до 100–120°C на поверхні, потрібна передача тепла, стійкість до старіння	Слюда + термопаста	Силіконова термопрокладка (наповнена)	Слюда+паста: $S = 4.40 > 3.70$ Краща електроізоляція і термостійкість; недолік — складніший монтаж
3. Корпус/кронштейн модуля	Захист, механічна міцність, стійкість до середовища, бажано відведення тепла; технологічність і ціна важливі	ABS-пластик	Алюмінієвий сплав (типу Al 6061)	Al-сплав: $S = 3.90 > 3.65$ Вища міцність і тепловідвід; потрібні заходи електробезпеки (ізоляція, заземлення)
4. Осердя дроселя у фільтрі (перемикання ~50 кГц)	Робота на підвищеній частоті, малі втрати, відсутність насичення, $T \leq 90^{\circ}C$	Ферит MnZn	Порошкове залізо (powdered iron)	Ферит: $S = 4.10 > 3.80$ Менші втрати на 50 кГц → вищий ККД і менший нагрів

Заповнення матриці вибору та розрахунку зваженої суми

Шкала оцінювання: 1-5, де 5 – найкращий результат.

Підсумок: $S = \sum \omega_i r_i$, де ω_i – ваги (сума ваг = 1), r_i – оцінка.

Вузол 1. Струмopрoвіднa шина/пpоvідник.

Обрані критерії і ваги (пояснення логіки): для 10А ключові електричні та теплові властивості, важливі корозія, технологія з'єднання та економіка.

Критерій	Вага (ω)	Cu (оцінка (r))	Al (оцінка (r))
K1. Електропровідність/малі втрати	0.40	5	4
K2. Тепловий режим (менший нагрів)	0.20	4	3
K3. Стійкість до корозії/окиснення	0.10	4	3
K4. Технологічність з'єднання (пайка/контакт)	0.10	5	3
K5. Вартість/маса/доступність	0.20	3	5

$$S_{Cu} = 0.40 \cdot 5 + 0.20 \cdot 4 + 0.10 \cdot 4 + 0.10 \cdot 5 + 0.20 \cdot 3 = 4.30$$

$$S_{Al} = 0.40 \cdot 4 + 0.20 \cdot 3 + 0.10 \cdot 3 + 0.10 \cdot 3 + 0.20 \cdot 5 = 3.80$$

Вибір: C_u (вищий інтегральний бал, менші втрати, простіша паяність, стабільніший контакт).

Вузол 2. Ізолююча теплопровідна прокладка (слюда+паста vs силіконова прокладка)

Для цього вузла однаково критичні ізоляція та теплопередача, а також термостійкість.

Критерій	Вага (ω)	Слюда	A_1 (оцінка (r))
K1. Електроізоляція/електроміцність	0.30	5	4
K2. Теплопередача	0.30	4	3
K3. Термостійкість/старіння	0.20	5	4
K4. Технологічність монтажу	0.10	3	5
K5. Вартість	0.10	4	3

$$S_{\text{слюда}} = 0.30 \cdot 5 + 0.30 \cdot 4 + 0.20 \cdot 5 + 0.10 \cdot 3 + 0.10 \cdot 4 = 4.40$$

$$S_{\text{силікон}} = 0.30 \cdot 4 + 0.30 \cdot 3 + 0.20 \cdot 4 + 0.10 \cdot 5 + 0.10 \cdot 3 = 3.70$$

Вибір: слюда+паста (краща ізоляція і термостійкість; монтаж складніший – це фіксується як недолік).

Вузол 3. Корпус/кронштейн (ABS vs Al-сплав)

Тут домінує механіка, але для модуля з тепловиділенням важливий тепловідвід, також враховується електробезпека, середовище й технологічність/ціна.

Критерій	Вага (ω)	ABS	Al - сплав
K1. Механічна міцність/жорсткість	0.30	3	5
K2. Стійкість до середовища	0.15	4	4
K3. Електробезпека (ізоляційність)	0.15	5	2
K4. Тепловідвід	0.15	1	5
K5. Технологічність і вартість	0.25	5	3

$$S_{\text{ABS}} = 0.30 \cdot 3 + 0.15 \cdot 4 + 0.15 \cdot 5 + 0.15 \cdot 1 + 0.25 \cdot 5 = 3.65$$

$$S_{\text{Al}} = 0.30 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.15 \cdot 2 + 0.15 \cdot 5 + 0.25 \cdot 3 = 3.90$$

Вибір: Al-сплав (кращий тепловідвід і міцність). Пояснення-компенсація недоліку: оскільки Al провідний, необхідно передбачити ізоляційні втулки/прокладки, заземлення або подвійний ізоляційний бар'єр.

Вузол 4. Осердя дроселя (ферит MnZn vs порошкове залізо)

Для 50 кГц ключовий критерій – втрати на частоті, далі насичення та температурна стабільність.

Критерій	Вага (ω)	Ферит MnZn	Порошкове залізо
К1. Втрати на частоті (50 кГц)	0.35	5	3
К2. Насичення/допустимий потік	0.25	3	5
К3. Температурна стабільність	0.15	4	4
К4. Доступність/технологічність	0.15	4	4
К5. Вартість	0.10	4	3

$$S_{\text{ферит}} = 0.35 \cdot 5 + 0.25 \cdot 3 + 0.15 \cdot 4 + 0.15 \cdot 4 + 0.10 \cdot 4 = 4.10$$

$$S_{\text{powder}} = 0.35 \cdot 3 + 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.15 \cdot 4 + 0.10 \cdot 3 = 3.80$$

Вибір: ферит MnZn (менші втрати на 50 кГц → менший нагрів і кращий ККД; насичення нижче, але компенсується підбором перерізу/зазору)

Висновок: у роботі для кожного вузла виробу визначено умови експлуатації за параметрами U , I , T та характеристиками середовища, після чого сформульовано вимоги до матеріалів і підібрано по дві альтернативи на основі довідникових даних. Для обґрунтованого вибору застосовано багатокритеріальну матрицю з ваговими коефіцієнтами та оцінюванням за шкалою 1–5. Оптимальний матеріал визначено за максимальним значенням зваженої суми. За результатами розрахунків обрано: для струмопровідної шини – мідь (мінімальні втрати та краща технологічність з'єднань), для теплопровідної ізоляції – слюда з термопастою (вищі показники електроізоляції та термостійкості), для корпусу – алюмінієвий сплав (вища міцність і тепловідвід за умови забезпечення електробезпеки), для осердя дроселя – ферит MnZn (мінімальні втрати на робочій частоті). Отриманий підхід забезпечує прозорий і відтворюваний вибір матеріалу з урахуванням експлуатаційних вимог та конструктивно-технологічних обмежень.

Контрольні питання

1. Які основні групи матеріалів застосовують у виробках (провідникові, ізоляційні, магнітні, конструкційні) та за якими ознаками їх класифікують?
2. Які експлуатаційні параметри вузла (U , I , T , середовище) найбільше впливають на вибір матеріалу, і як саме вони формують перелік вимог?
3. Які критерії вибору матеріалу належать до електричних, теплових, механічних і технологічних, наведіть приклади для конкретного вузла?
4. Як формується матриця вибору з ваговими коефіцієнтами: як обирають ваги, як виставляють оцінки за шкалою 1–5 та як обчислюють підсумковий бал (зважену суму)?
5. Як обґрунтувати остаточний вибір матеріалу у висновку: які дані та результати розрахунків необхідно навести, і які компроміси слід зазначити?

Вимоги до звіту

Звіт оформити за структурою: тема, мета, вихідні дані, таблиці/розрахунки, висновок, відповіді на контрольні питання.

Варіанти виконання роботи

№	Вузол 1 (провідник/шина/доріжка)	Вузол 2 (ізоляція/прокладка/діелектрик)	Вузол 3 (корпус/кронштейн/несуча деталь)	Вузол 4 (контакти/магнітний елемент/спецвузол)
1	Шина живлення 24 В DC: $U=24$ В, $I=10$ А, T до 70°C , вологість помірна	Ізолююча термопрокладка під MOSFET: U до 100 В, T до 120°C	Корпус модуля: T $-10\dots+60^{\circ}\text{C}$, приміщення, невеликі вібрації	Осердя дроселя 50 кГц: T до 90°C , низькі втрати на частоті
2	Провідник зарядного 5 В: $U=5$ В, $I=3$ А, T до 50°C	Ізоляція USB-роз'єму/вставка: U до 30 В, T до 80°C , знос від підключень	Корпус зарядного: T до 60°C , вимога пожежобезпеки	Контакти роз'єму: багато циклів, корозія від дотику, стабільний контактний опір
3	Силові доріжки плати 12 В: $U=12$ В, $I=8$ А, T до 80°C	Лак/покриття плати: U до 60 В, вологість висока, можливий конденсат	Кронштейн кріплення: T $-20\dots+70^{\circ}\text{C}$, вібрація	Пружний контакт (пружина): циклічні навантаження, корозійна стійкість
4	Шина інвертора 48 В: $U=48$ В, $I=30$ А, T до 90°C	Ізоляційна втулка під болтове з'єднання: U до 100 В, T до 120°C	Радіатор/основа силового модуля: T до 110°C	Матеріал для паяння/з'єднання:

				термоцикли, надійність контакту
5	Вхід мережі 230 В АС: U=230 В, I=2 А, Т до 60°C	Ізоляційна перегородка: U до 400 В, Т до 100°C, вимога трекінг-стійкості	Корпус блока живлення: Т до 70°C, пожежобезпека	Сердечник трансформатора 50 Гц: втрати, гул, нагрів
6	Клемний провідник 24 В: U=24 В, I=15 А, Т до 80°C, пил	Діелектрик клемника: U до 60 В, Т до 120°C, механічна міцність	Монтажна планка: корозія, вологість 80%	Контакт клеми: окиснення, стабільність притискання
7	Сигнальна лінія датчика: U=3.3 В, I до 0.05 А, Т -20...+60°C	Ізоляція кабелю: вологість, УФ (встановлення біля вікна), Т до 70°C	Корпус датчика (IP54): пил, бризки	Екранування (ЕМС): вимога зниження перешкод (матеріал екрана/покриття)
8	Світлодіодний драйвер 36 В: U=36 В, I=2 А, Т до 85°C	Заливний компаунд: електроізоляція, відвід тепла, Т до 110°C	Корпус світильника: вулиця, дощ, УФ, Т -30...+50°C	Контакти/клеми: волога, корозія, багаторазовий монтаж
9	Електродвигун 24 В (живлення): U=24 В, I=12 А, пусковий до 30 А, Т до 90°C	Ізоляція обмотки/просочення: Т до 155°C (клас нагрівостійкості)	Корпус/кришка: вібрації, ударні навантаження	Підшипниковий вузол (матеріал сепаратора/втулки): знос, температура, мастило
10	Нагрівач 48 В: U=48 В, I=8 А, Т поверхні до 200°C	Електроізоляційна керамічна вставка: U до 100 В, Т до 250°C	Каркас/рамка: термостійкість, мінімальна деформація	Резистивний елемент: стабільність опору при нагріві, окиснення
11	Плата керування 230 В (низькі струми): U=230 В, I до 0.5 А, Т до 60°C	Матеріал основи плати: електроміцність, трекінг, вологість	Корпус: пожежобезпека, тепло	Реле: контактна група: дугостійкість, знос, контактний опір
12	Акумуляторний блок 12 В: U=12 В, I=20 А, Т -10...+50°C	Ізоляція між комірками: стійкість до електроліту, Т до 80°C	Кожух: ударостійкість, низька маса	Шини з'єднання комірок: корозія, контактний опір, зварювання
13	ВЧ-модуль (антена/тракт): U до 12 В, I до 1 А, частота 2.4 ГГц	Діелектрик під ВЧ (плата/підкладка): низькі втрати, стабільність ϵ	Корпус: екранування, мала маса	Екран/кришка (ЕМІ): технологічність пайки, корозійна стійкість
14	Соленоїд 24 В: U=24 В, I=3 А, Т котушки до 120°C	Ізоляція котушки: клас термостійкості, механічна міцність	Шток/якір: знос, корозія, магнітні властивості	Магнітопровід: м'якомагнітний матеріал, мінімум втрат і залишкової намагніченості
15	Польовий контролер 48 В (outdoor): U=48 В, I=5 А, Т -30...+60°C	Герметик/ущільнення: волога/пил IP65, старіння, УФ	Корпус: соляний туман (біля дороги/моря), корозія	Клеми/контакти: корозія, стабільність контакту, гальванічні пари

Практична робота №3

Провідники і шини: розрахунок перерізу за нагрівом

Мета роботи: набуття навичок інженерного розрахунку мінімально допустимого перерізу струмопровідних провідників і шин за умовами тривалого допустимого нагріву, а також порівняльний аналіз мідних і алюмінієвих провідників з урахуванням їх електричних, теплових і масогабаритних характеристик.

Обладнання та матеріали

1. Заданий робочий струм навантаження I ;
2. Умови прокладання провідника (відкрите повітря, кабельний канал, пучок, температура довкілля);
3. Довідкові значення допустимої густини струму $J_{\text{доп}}$ або таблиці тривалих допустимих струмів;
4. Довідкові значення питомого електричного опору матеріалів;

Короткі теоретичні відомості

Струмопровідні елементи електротехнічних і електроенергетичних установок у процесі роботи зазнають нагріву внаслідок втрат електричної енергії, зумовлених наявністю електричного опору матеріалу. Основним джерелом тепловиділення в провіднику є джоулеві втрати, які визначаються виразом

$$P_{\text{вт}} = I^2 R$$

де I – струм, що протікає через провідник, R – його електричний опір. Усталена температура провідника встановлюється внаслідок теплової рівноваги між виділеною потужністю втрат і відведенням тепла в навколишнє середовище шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Перевищення допустимої температури струмопровідних елементів є неприпустимим, оскільки призводить до прискореного старіння ізоляції, зниження механічної міцності матеріалу, зростання електричного опору та, у граничних випадках, до аварійного руйнування провідника або пожежі. Тому під час

проектування електричних мереж і апаратів одним з основних критеріїв вибору перерізу провідника є умова допустимого нагріву.

У практичних інженерних розрахунках тепловий режим провідників часто оцінюють за допомогою поняття допустимої густини струму

$$J = \frac{I}{S}$$

де S – площа поперечного перерізу провідника. Для заданих умов прокладання та матеріалу існує граничне значення густини струму $J_{\text{доп}}$ при якому температура провідника не перевищує допустимого значення в тривалому режимі роботи. Значення $J_{\text{доп}}$ встановлюються нормативними документами або довідковими таблицями та залежать від матеріалу провідника, способу прокладання, температури навколишнього середовища та умов теплообміну.

Мідь і алюміній є найбільш поширеними матеріалами струмопровідних елементів. Мідь характеризується меншою питомою електричною опірністю, що зумовлює менші втрати потужності та нагрів при однаковому струмі. Алюміній, у свою чергу, має меншу густину ρ , відповідно, меншу масу провідника при однаковому перерізі, а також часто є економічно вигіднішим. Вибір між міддю та алюмінієм є інженерним компромісом між електричними, тепловими, механічними та економічними показниками.

Порядок виконання

1. За заданими вихідними даними визначити робочий струм навантаження I та умови прокладання провідника.
2. За довідковими даними або нормативними таблицями прийняти значення допустимої густини струму $J_{\text{доп}}$ для мідного та алюмінієвого провідників за заданих умов.
3. Обчислити мінімально допустимий переріз провідника за умовами нагріву:

$$S_{min} = \frac{I}{J_{доп}}$$

4. За стандартним рядом перерізів вибрати найближчий більший стандартний переріз $S_{ст}$.
5. Для обраного стандартного перерізу визначити електричний опір провідника довжиною 1 м та відповідні втрати потужності.
6. Виконати аналогічні розрахунки для мідного й алюмінієвого провідників та провести їх порівняння.
7. Сформулювати висновок щодо доцільності застосування кожного матеріалу в заданих умовах експлуатації.

Приклад виконання

Нехай задано тривалий робочий струм навантаження $I = 40 \text{ А}$. Провідник прокладений відкрито в повітрі за нормальної температури довкілля.

За довідковими даними приймаємо:

1. для мідного провідника $J_{доп,Cu} = 6 \text{ А/мм}^2$;
2. для алюмінієвого провідника $J_{доп,Al} = 4 \text{ А/мм}^2$;

Мінімально допустимий переріз:

$$S_{min,Cu} = \frac{40}{6} \approx 6,7 \text{ мм}^2,$$

$$S_{min,Al} = \frac{40}{4} = 10 \text{ мм}^2.$$

За стандартним рядом приймаємо:

1. для міді $S_{ст} = 10 \text{ мм}^2$;
2. для алюмінію $S_{ст} = 16 \text{ мм}^2$.

Матеріал	$I, \text{ А}$	$J_{доп}, \text{ А/мм}^2$	$S_{min}, \text{ мм}^2$	$S_{ст}, \text{ мм}^2$	$R (1 \text{ м}), \text{ Ом}$	$P_{вт} (1 \text{ м}), \text{ Вт}$
Мідь	40	6	6,7	10	менше	менші
Алюміній	40	4	10	16	більше	більші

Отримані результати показують, що за однакових умов мідний провідник має менші втрати потужності та нагрів, тоді як алюмінієвий потребує більшого перерізу, але має меншу масу та потенційно нижчу вартість.

Контрольні питання

1. Від чого залежить $J_{\text{доп}}$?
2. Чому важливий контактний опір?
3. Переваги Al?
4. Як впливає температура середовища?

Вимоги до звіту

Звіт оформити за структурою: тема, мета, вихідні дані, таблиці/розрахунки, висновок, відповіді на контрольні питання.

Варіанти виконання роботи

Варіант 1

$I = 25 \text{ А}$, відкрите повітря, $t_{\text{довк}} = 20^\circ \text{C}$, довжина для оцінки втрат $L = 1 \text{ м}$
 $J_{\text{доп, Cu}} = 6,5 \text{ А/мм}^2$, $J_{\text{доп, Al}} = 4,5 \text{ А/мм}^2$

Варіант 2

$I = 40 \text{ А}$, відкрите повітря, 20°C , $L = 1 \text{ м}$
 $J_{\text{доп, Cu}} = 6,0$, $J_{\text{доп, Al}} = 4,0$

Варіант 3

$I = 63 \text{ А}$, кабельний канал, 25°C , $L = 1 \text{ м}$
 $J_{\text{доп, Cu}} = 5,0$, $J_{\text{доп, Al}} = 3,3$

Варіант 4

$I = 80 \text{ А}$, кабельний канал, 30°C , $L = 1 \text{ м}$
 $J_{\text{доп, Cu}} = 4,6$, $J_{\text{доп, Al}} = 3,0$

Варіант 5

$I = 100$ А, пучок (3–5 проводів разом), 25°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 4,2, J_{\text{доп,Al}} = 2,8$$

Варіант 6

$I = 125$ А, пучок (6–9 проводів), 30°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 3,8, J_{\text{доп,Al}} = 2,5$$

Варіант 7

$I = 160$ А, шинопровід у шафі (обмежена вентиляція), 35°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 3,5, J_{\text{доп,Al}} = 2,3$$

Варіант 8

$I = 200$ А, відкрите повітря, 40°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 4,5, J_{\text{доп,Al}} = 3,0$$

Варіант 9

$I = 250$ А, шинопровід у шафі, 30°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 3,3, J_{\text{доп,Al}} = 2,2$$

Варіант 10

$I = 315$ А, кабельний канал, 35°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 3,0, J_{\text{доп,Al}} = 2,0$$

Варіант 11

$I = 400$ А, відкрите повітря, 25°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 4,0, J_{\text{доп,Al}} = 2,7$$

Варіант 12

$I = 500$ А, шинопровід у шафі, 40°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 2,8, J_{\text{доп,Al}} = 1,9$$

Варіант 13

$I = 630$ А, пучок (3 паралельні жили на фазу), 30°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 2,6, J_{\text{доп,Al}} = 1,8$$

Варіант 14

$I = 800$ А, шинопровід (добра вентиляція), 25°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 3,0, J_{\text{доп,Al}} = 2,0$$

Варіант 15

$I = 1000$ А, шинопровід у шафі (підвищена температура), 45°C , $L = 1$ м

$$J_{\text{доп,Cu}} = 2,4, J_{\text{доп,Al}} = 1,6$$

Практична робота № 4

Паяні з'єднання: припої, флюси, дефекти

Мета роботи: підібрати припій/флюс та оцінити вплив дефектів пайки на якість з'єднання.

Обладнання та матеріали

1. Перелік припоїв/флюсів
2. Фото/зразки дефектів
3. Мультиметр

Короткі теоретичні відомості

Паяння є одним із базових технологічних процесів утворення нероз'ємних електричних і механічних з'єднань у електротехніці та електроніці, що реалізується шляхом введення розплавленого припою в зазор між деталями без розплавлення основного металу. Якість паяного з'єднання визначається сукупністю металургійних і фізико-хімічних явищ, серед яких ключову роль відіграють змочування, капілярне заповнення зазору та формування тонкого міжфазного шару інтерметалідів на межі «основний метал – припій». Для забезпечення ефективного змочування поверхня основного металу має бути очищена від оксидних плівок і забруднень, оскільки оксиди міді, олова, алюмінію та інших металів є термодинамічно стійкими і суттєво знижують поверхневу енергію взаємодії з розплавом, що перешкоджає розтіканню припою та утворенню суцільного контакту. Саме тому застосовують флюси – хімічно активні або слабоактивні технологічні матеріали, які під час нагріву розчиняють або відновлюють оксидні плівки, екранують поверхню від повторного окиснення та зменшують поверхневий натяг припою, покращуючи змочування і зміну контактного кута. Тип флюсу обирають залежно від матеріалу основи, ступеня окиснення, температурного режиму та вимог до корозійної безпеки; при цьому важливо враховувати, що залишки активних флюсів (особливо кислотних або галогеновмісних) можуть зумовлювати електрохімічну корозію, підвищення струмів витоку і деградацію

ізоляційних проміжків, тому в багатьох випадках потрібне ретельне очищення або застосування безвідмивних складів з контрольованою активністю.

Вибір припою визначається не лише температурою плавлення та технологічною зручністю, а й сумісністю з матеріалом основи, електропровідністю, механічними властивостями та довговічністю з'єднання в заданому середовищі. Припої мають забезпечувати достатню текучість і змочувальну здатність при робочих температурах пайки, формувати міцний металургійний контакт та не спричиняти надмірного росту крихких інтерметалідних фаз, які можуть погіршувати втомну міцність і тріщиностійкість. У електротехнічних вузлах важливим є також вплив припою на перехідний опір контакту: хоча основний струм зазвичай протікає через базові провідні елементи, якість паяного шару та відсутність дефектів істотно визначають стабільність електричного контакту, локальний тепловий режим і, як наслідок, ресурс з'єднання. Корозійна стійкість системи «основний метал – припій – залишки флюсу» є критичною при експлуатації у вологому середовищі або за наявності іонних забруднень, оскільки мікрогальванічні пари та залишкова іонна провідність можуть прискорювати руйнування.

Дефекти пайки є наслідком порушення змочування, неправильного температурно-часового режиму, недостатнього очищення поверхні, невірної вибору флюсу або припою, а також механічних збурень під час кристалізації. До типових дефектів належать непропай (неповне заповнення зазору припоєм), пористість і газові включення, тріщини, пустоти, надмірний або недостатній об'єм припою, перегрів із деградацією флюсу та окисненням, а також залишки флюсу чи забруднень у зоні контакту. Такі дефекти зменшують ефективну площу електричного контакту, збільшують перехідний опір і викликають локальне тепловиділення під навантаженням, що може призводити до прискореного старіння, термоупружних руйнувань та відмов унаслідок циклічного нагріву. Пористість і включення є концентраторами напружень і знижують механічну

міцність, а залишки флюсу здатні погіршувати електроізоляційні характеристики та стимулювати корозію, особливо в присутності вологи. Оцінювання якості паяного з'єднання має включати аналіз правильності вибору припою і флюсу, відповідності технологічного режиму, виявлення характерних дефектів та прогноз їхнього впливу на електричні параметри (опір, нагрів), механічну надійність і довговічність з'єднання в реальних умовах експлуатації.

Порядок виконання

1. Вибрати матеріал основи та умови роботи (варіант).
2. Підібрати 2 припої та флюс, обґрунтувати.
3. Оцінити ризики дефектів і профілактику.
4. Сформулювати рекомендації контролю якості.

Приклад виконання роботи

Матеріал основи: мідні провідники та мідна контактна площадка (Cu).

Тип з'єднання: провід–площадка (електронний монтаж).

Умови роботи: приміщення з підвищеною вологістю (до 80%), температура 0...+40 °С, можливі вібрації (періодичні).

Вимоги: стабільний низький перехідний опір, висока довговічність, мінімальний ризик корозії.

Підбір 2 припоїв та флюсу

Припій 1 (олово-яно-свинцевий, Sn60Pb40 або Sn63Pb37)

1. **Переваги:** добра змочуваність міді, відносно низька температура плавлення, пластичність шва (краще переносить термоцикли та вібрації).
2. **Недоліки/обмеження:** екологічні обмеження для деяких сфер (RoHS), небажаний для виробів із суворими вимогами до безсвинцевості.

Припій 2 (безсвинцевий, SAC305: Sn96.5Ag3.0Cu0.5)

1. **Переваги:** відповідає безсвинцевим вимогам, достатня механічна міцність, широко застосовується у промисловості.
2. **Особливості:** вища температура пайки, більший ризик перегріву площадок/відшарування, потрібен контроль режиму.

Флюс (каніфольний/слабкоактивний, тип R або RMA / «no-clean» з низьким вмістом галогенів)

Мідь має оксидну плівку, яку потрібно видалити, але за умов підвищеної вологості важливо мінімізувати іонні залишки. Слабкоактивний флюс забезпечує змочування й знижує корозійні ризики. «no-clean» допустимий за умови акуратного дозування та відсутності надлишку. Якщо використовується активніший флюс (RA), після пайки обов'язкове очищення.

Оцінка ризиків дефектів і профілактика

Дефект	Основні причини	Профілактика
Непропай (погане змочування)	1. Окиснення міді; 2. недостатній нагрів; 3. низька активність флюсу	Очищення/знежирення; правильний флюс; достатній прогрів площадки й проводу; контроль температури жала/профілю
Пори та включення	1. Волога на поверхні; 2. перегрів флюсу; 3. забруднення	Сушіння/правильне зберігання; уникнення перегріву; достатній час змочування без «кипіння» флюсу
Залишки флюсу (іонна провідність – корозія/витоки)	1. Надлишок флюсу; 2. активні (кислотні/галогеновмісні) флюси; 3. висока вологість	Мінімум флюсу; low-residue/no-clean; для активних флюсів – обов'язкове відмивання (ізопропанол/очишувач)
«Холодний» шов (матовий, крихкий)	1. Рух з'єднання під час кристалізації; 2. недостатня температура	Фіксація деталей; правильна теплова подача; не рухати до повного затвердіння

Контрольні питання

1. Навіщо видаляти флюс?
2. М'яка vs тверда пайка?
3. Проблеми пайки Al?
4. Як виявляють дефекти?

Вимоги до звіту

Звіт оформити за структурою: тема, мета, вихідні дані, таблиці/розрахунки, висновок, відповіді на контрольні питання.

Варіанти виконання роботи

№	Матеріал основи / покриття	Тип з'єднання	Умови роботи	Додаткова вимога
1	Cu (мідь)	провід–площадка	приміщення, нормальна вологість	мінімальний опір контакту
2	Cu (лужена мідь)	провід–клема	підвищена вологість	мінімізувати корозію
3	Al (алюміній)	провід–шина	відкрите повітря	врахувати оксидну плівку Al
4	Латунь	контактна пластина–провід	помірні вібрації	механічна надійність
5	Нержавіюча сталь	елемент–провід	кімнатні умови	складнозмочувана основа
6	Cu + Ni (нікельоване покриття)	контакт–провід	волога атмосфера	низькі залишки флюсу
7	Cu + Ag (посріблення)	ВЧ-контакт	сухе приміщення	мінімальні втрати/якість змочування
8	Cu + Sn (луження)	монтаж друк.плати	термоцикли -20...+60 °С	стійкість до втоми
9	Мідна шина	масивний вузол	потрібна висока теплова потужність пайки	ризик “непропаю” через теплоємність
10	Друкована плата (Cu-площадки)	SMD-компонент	масове виробництво	мінімізувати “містки” припою
11	Cu-провід	з'єднання з датчиком	хімічно активне середовище (пари)	корозійна стійкість
12	Луджені провідники	з'єднання джгутів	вібрації + волога	обов'язковий контроль залишків флюсу
13	Мідний радіатор/екран	пайка масивної деталі	підвищена температура роботи	ризик перегріву та пор
14	Cu + Au (позолота)	тонкі контакти	нормальні умови	уникати крихких фаз/перегріву
15	Al + Cu (різнорідні метали)	перехідне з'єднання	відкрите повітря	оцінити гальванічні ризики

Практична робота №5

Діелектричні матеріали: електрична міцність і вибір ізоляції

Мета роботи: вивчити основні електричні характеристик діелектричних матеріалів, зокрема електричної міцності, аналіз факторів, що впливають на пробій ізоляції, а також набуття навичок інженерного вибору діелектрика для електротехнічних пристроїв і апаратів за умовами робочої напруги та експлуатації

Обладнання та матеріали

1. Задана робоча напруга електричного кола U ;
2. Тип електричного поля (постійне або змінне);
3. Значення електричної міцності діелектриків;
4. Геометричні параметри ізоляційного шару (товщина);
5. Нормативні коефіцієнти запасу.

Короткі теоретичні відомості

Діелектричні матеріали широко застосовуються в електротехніці для електричної ізоляції струмопровідних частин, розділення елементів з різним потенціалом і запобігання протіканню струмів витоку. Основною електричною характеристикою діелектрика є електрична міцність, яка визначає його здатність протистояти пробою під дією електричного поля.

Електричною міцністю діелектрика називають максимальну напруженість електричного поля, за якої матеріал ще зберігає ізоляційні властивості:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}$$

де $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою, d – товщина діелектричного шару. При перевищенні допустимої напруженості електричного поля в діелектрику відбувається пробій, що супроводжується різким зростанням струму та руйнуванням матеріалу.

Електрична міцність залежить від фізичної природи матеріалу, його структури, вологості, температури, частоти прикладеної напруги та тривалості дії електричного поля. Для твердих діелектриків характерні вищі значення електричної міцності порівняно з рідкими й газоподібними, однак у реальних умовах експлуатації надійність ізоляції значною мірою визначається якістю виготовлення та станом поверхні.

Під час інженерних розрахунків вибір діелектричного матеріалу здійснюється з урахуванням коефіцієнта запасу, який компенсує вплив старіння, дефектів, коливань температури та інших експлуатаційних факторів. Таким чином, допустима робоча напруженість електричного поля визначається як

$$E_{\text{доп}} = \frac{E_{\text{пр}}}{k}$$

де k – коефіцієнт запасу електричної міцності.

Порядок виконання

1. Задати або прийняти значення робочої напруги електричного кола U .
2. Обрати тип діелектричного матеріалу відповідно до умов експлуатації.
3. Визначити електричну міцність обраного матеріалу $E_{\text{пр}}$.
4. Прийняти коефіцієнт запасу електричної міцності k .
5. Обчислити допустиму напруженість електричного поля $E_{\text{доп}}$.
6. Визначити мінімально допустиму товщину ізоляції:

$$d_{\text{min}} = \frac{U}{E_{\text{доп}}}$$

7. За стандартним рядом вибрати найближче більше значення товщини ізоляційного шару.
8. Зробити висновок щодо придатності обраного діелектрика.

Приклад виконання роботи

Вихідні дані:

Робоча напруга: $U=5,0$ кВ

Тип поля: змінне (50 Гц)

Обраний діелектрик: кабельний ПВХ-пластикат

Електрична міцність матеріалу: $E_{пр}=20$ кВ/мм

Коефіцієнт запасу: $k=3$

Стандартний ряд товщин (мм): **0.5; 0.8; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 8.0; 10.0**

Допустима напруженість поля:

$$E_{доп} = \frac{E_{пр}}{k} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ кВ/мм}$$

Мінімальна товщина ізоляції

$$d_{\min} = \frac{U}{E_{доп}} = \frac{5,0}{6,67} = 0,75 \text{ мм}$$

Вибір стандартної товщини

Найближче більше значення зі стандартного ряду:

$$d_{ст} = 0,8 \text{ мм}$$

Висновок: для робочої напруги 5 кВ у змінному полі при $E_{пр}=20$ кВ/мм та запасі $k=3$ мінімально необхідна товщина ізоляції становить $d_{\min}=0,75$ мм. Прийнята стандартна товщина $d_{ст}=0,8$ мм забезпечує потрібний запас електричної міцності, тому ПВХ-ізоляція є придатною за зазначених умов (за умови відсутності підвищеної температури та агресивного середовища).

Контрольні питання

1. Що називають електричною міцністю діелектрика?
2. Які фактори впливають на напругу пробою ізоляції?
3. Для чого вводиться коефіцієнт запасу електричної міцності?
4. Чим відрізняються умови роботи ізоляції за постійної та змінної напруги?

Вимоги до звіту

Звіт оформити за структурою: тема, мета, вихідні дані, таблиці/розрахунки, висновок, відповіді на контрольні питання.

Варіанти виконання роботи

Варіант 1

$U = 1,0$ кВ, поле: постійне

Матеріал: папір електроізоляційний (просочений)

$E_{\text{пр}} = 15$ кВ/мм, $k = 3,0$

Варіант 2

$U = 2,5$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: ПВХ

$E_{\text{пр}} = 20$ кВ/мм, $k = 3,0$

Варіант 3

$U = 6,0$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: гума ізоляційна (EPDM)

$E_{\text{пр}} = 18$ кВ/мм, $k = 3,5$

Варіант 4

$U = 10$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: поліетилен (PE)

$E_{\text{пр}} = 25$ кВ/мм, $k = 3,0$

Варіант 5

$U = 12$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: склотекстоліт

$E_{\text{пр}} = 30$ кВ/мм, $k = 4,0$

Варіант 6

$U = 0,4$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: лакотканина

$E_{\text{пр}} = 12$ кВ/мм, $k = 2,5$

Варіант 7

$U = 3,0$ кВ, поле: постійне

Матеріал: фторопласт (PTFE)

$E_{\text{пр}} = 60$ кВ/мм, $k = 4,0$

Варіант 8

$U = 15$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: епоксидна смола (залівка)

$E_{\text{пр}} = 22$ кВ/мм, $k = 4,0$

Варіант 9

$U = 20$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: фарфор (кераміка)

$E_{\text{пр}} = 12$ кВ/мм, $k = 5,0$

Варіант 10

$U = 5,0$ кВ, поле: постійне

Матеріал: поліімідна плівка

$E_{\text{пр}} = 200$ кВ/мм, $k = 5,0$

Варіант 11

$U = 8,0$ кВ, поле: змінне (400 Гц)

Матеріал: ПЕТ (поліестерна плівка)

$E_{\text{пр}} = 120$ кВ/мм, $k = 6,0$

Варіант 12

$U = 24$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: трансформаторна олива (рідкий діелектрик)

$E_{\text{пр}} = 10$ кВ/мм, $k = 4,0$

Варіант 13

$U = 35$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: повітряний проміжок (сухе повітря)

$E_{\text{пр}} = 3$ кВ/мм, $k = 5,0$

Варіант 14

$U = 0,23$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: поліпропілен (PP)

$E_{\text{пр}} = 30$ кВ/мм, $k = 3,0$

Варіант 15

$U = 6,6$ кВ, поле: змінне (50 Гц)

Матеріал: силіконова гума

$E_{\text{пр}} = 20$ кВ/мм, $k = 4,0$

Практична робота №6

Рідкі діелектрики: оцінка стану трансформаторної оливи

Мета роботи: комплексна діагностична оцінка технічного стану трансформаторної оливи як рідкого діелектрика на основі аналізу її ключових експлуатаційних показників.

Обладнання та матеріали

1. Дані: $U_{пр}$, вологість, кислотне число, $tg\delta$ (варіант)
2. Нормативні межі.

Короткі теоретичні відомості

Трансформаторна олива є функціональним елементом ізоляційної системи силового трансформатора та одночасно виконує дві ключові ролі: електроізоляційну – забезпечує електричну міцність проміжків між струмопровідними частинами й твердими ізоляційними бар'єрами, і тепловідвідну – забезпечує перенесення та відведення тепла від активної частини до системи охолодження. Оскільки деградаційні процеси в оливі мають різну природу (фізичну, хімічну та електрофізичну) і можуть проявлятися подібними змінами окремих показників, технічний стан оливи доцільно оцінювати комплексно, тобто за сукупністю взаємопов'язаних параметрів. Зокрема, зниження пробивної напруги може бути наслідком як зволоження, так і забруднення дисперсними частинками, тоді як зростання кислотного числа переважно відображає окиснювальне старіння та накопичення полярних продуктів окиснення.

Пробивна напруга $U_{пр}$ є базовим індикатором електричної міцності рідкого діелектрика, тобто його здатності витримувати електричне поле без електричного пробою за заданих умов випробування. Для однорідного проміжку її пов'язують з напруженістю пробою як:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d},$$

де d – міжелектродний зазор.

На практиці $U_{пр}$ істотно залежить від вмісту води (розчиненої та емульсійної), газових включень і бульбашок, механічних домішок (волокна, пил, продукти зносу), а також продуктів старіння, що змінюють полярність середовища

та його електропровідність. Критичною є наявність емульсійної або вільної води у вигляді мікрокрапель: такі неоднорідності формують локальні області підвищеної напруженості поля, ініціюють часткові розряди та різко знижують $U_{пр}$. Через високу чутливість показника до мікрозабруднень пробивна напруга є також залежною від якості відбору й підготовки проби, чистоти тари та дотримання стандартної процедури випробування.

Вологовміст w (часто виражається у ppm) є одним із визначальних факторів, що впливають на ізоляційні характеристики системи «олива–папір». Вода в оливі може перебувати у формі розчиненої, емульсійної (дрібнодисперсні краплі) або вільної фази при перенасиченні. Рівноважна розчинність води в оливі є температурозалежною величиною, тобто $w_{sat} = w_{sat}(T)$, причому зі зростанням температури w_{sat} зазвичай збільшується, а при охолодженні – зменшується, що може спричиняти випадання води в емульсію або відокремлення вільної фази. Наявність вологи знижує $U_{пр}$, підвищує діелектричні втрати (особливо за присутності полярних домішок) та прискорює старіння целюлозної ізоляції через гідроліз; у підсумку це погіршує електричний ресурс усієї ізоляційної системи та підвищує імовірність аварійних режимів.

Кислотне число K (мг КОН/г) характеризує сумарний вміст кислотних сполук – продуктів окиснення і є інформативним показником хімічної деградації оливи. Зростання K свідчить про прогресуюче окиснення в умовах нагріву та доступу кисню, утворення полярних компонентів (органічні кислоти, смоли) і втрату стабільності з підвищенням ризику утворення шламу/осаду. У лабораторній практиці кислотне число визначають титруванням і розраховують, наприклад, за співвідношенням:

$$K = \frac{V \cdot c \cdot 56.1}{m},$$

де V – об'єм титранту (мл), c – молярна концентрація КОН (моль/л), 56.1 – молярна маса КОН (г/моль), m — маса зразка (г).

Продукти окиснення погіршують теплообмін через відкладення на поверхнях, підвищують електропровідність і можуть каталізувати подальше старіння, зокрема за рахунок каталізу металами (міді, заліза).

Тангенс кута діелектричних втрат $\tan\delta$ (або $\text{tg}\delta$) відображає рівень енергетичних втрат у діелектрику при змінній напрузі та є чутливим до полярних домішок, зростання провідності й вологовмісту, а також до газонасичення та дисперсних включень. На рівні електрофізичної інтерпретації $\tan\delta$ задають як відношення активної та реактивної складових струму:

$$\tan \delta = \frac{I_{\text{актив}}}{I_{\text{реакт}}},$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'},$$

де ϵ' – дійсна складова (накопичення енергії), ϵ'' – уявна складова (втрати). Для еквівалентної ємнісної моделі втрати потужності можуть бути записані як:

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

де $\omega=2\pi f$ – кутова частота, C – еквівалентна ємність, U – діюче значення напруги.

Зростання $\tan\delta$ означає збільшення питомих втрат на нагрів, що в реальних умовах може спричиняти додатковий локальний підігрів оливи, прискорення старіння та зниження ізоляційної надійності.

Інженерна діагностика базується на аналізі причинно-наслідкових зв'язків між показниками. Комбінація «низьке $U_{\text{пр}}$ + підвищений w » є характерною для зволоження, що часто пов'язане з негерметичністю, режимами «дихання» трансформатора та конденсацією при охолодженні; поєднання «високе K + високе $\tan\delta$ » вказує на окиснювальне старіння та накопичення полярних продуктів; ситуація «низьке $U_{\text{пр}}$ при нормальному w » частіше асоціюється з наявністю твердих домішок, газових включень або порушенням відбору/підготовки проби; «високий w при помірному K » зазвичай означає переважно проблему осушення та

герметичності. Важливо, що підвищене кислотне число, як правило, сигналізує про необхідність регенерації або заміни оливи, оскільки типові операції фільтрації та дегазації не видаляють розчинені кислоти.

Вибір відновлювальних заходів визначають домінуючим механізмом деградації та цільовими показниками. Фільтрація є ефективною для видалення механічних домішок і частини шламу та зазвичай призводить до зростання $U_{\text{пр}}$, однак не усуває розчинені кислотні продукти. Дегазація спрямована на вилучення розчинених газів і бульбашок, зменшуючи імовірність пробою та нестабільність $U_{\text{пр}}$. Осушення (вакуумне або адсорбційне) знижує w , підвищує $U_{\text{пр}}$ і зменшує діелектричні втрати. Регенерація, як правило адсорбційна, забезпечує вилучення полярних продуктів старіння, що проявляється зменшенням ККК і $\tan\delta$. Заміна оливи застосовується за критичної деградації або у випадках, коли регенерація є технічно неможливою чи економічно недоцільною.

Порядок виконання

1. Підготовка даних та нормативів;
2. Нормативне порівняння показників;
3. Діагностична інтерпретація (встановлення причин);
4. Вибір і обґрунтування відновлювальних заходів.

Приклад виконання роботи

Вихідні дані:

$$U_{\text{пр}} = 38 \text{ кВ}$$

$$\text{Вологість } W = 42 \text{ ppm (мг/кг)}$$

$$\text{Кислотне число } K = 0,06 \text{ мг КОН/г}$$

$$\text{tg}\delta = 0,008 \text{ (безрозмірний)}$$

Умовні нормативні межі:

$$U_{\text{пр}} \geq 50 \text{ кВ}$$

$$W \leq 20 \text{ ppm}$$

$$K \leq 0,10 \text{ мг КОН/г}$$

$$\text{tg}\delta \leq 0,005$$

Встановлено нормативні межі для кожного параметра:

1. $U_{\text{пр}} = 38 \text{ кВ} < 50 \text{ кВ}$ – не відповідає нормі (занижено)
2. $W = 42 \text{ ppm} > 20 \text{ ppm}$ – не відповідає нормі (підвищено)
3. $K = 0,06 \text{ мг КОН/г} \leq 0,10$ – в межах норми
4. $\text{tg}\delta = 0,008 > 0,005$ – не відповідає нормі (підвищено)

Діагностична інтерпретація

1. Підвищена вологість (W) є найбільш імовірним первинним фактором деградації, оскільки вода: зменшує $U_{\text{пр}}$ через утворення локальних «слабких місць» у полі та збільшує втрати, особливо за наявності полярних домішок.
2. Підвищений $\text{tg}\delta$ у поєднанні з високою вологістю свідчить про збільшення провідникової складової струму витоку та можливу наявність полярних домішок (ранні продукти старіння або забруднення), але без вираженого росту кислотності.
3. Нормальне кислотне число (K) вказує, що окиснювальне старіння (накопичення кислот) поки що не є критичним.

Ймовірні причини зволоження: порушення герметичності через осушувач, виснажений або зволожений силікагель у повітроосушувачі, перенесення вологи з паперової ізоляції в оливу (особливо при нагріві).

Вибір і обґрунтування відновлювальних заходів

1. Вакуумне осушення + дегазація, що дозволить знизити W в наслідок чого зросте показник $U_{\text{пр}}$ та зменшиться $\text{tg}\delta$.
2. Перевірка та відновлення герметичності/системи для усунення джерела повторного зволоження, що дозволить отримати стабілізацію показників після обробки.

Контрольні питання

1. Чому волога критична?
2. Навіщо дегазация?
3. Окиснення оливи - наслідки?
4. Що показує кислотне число?

Вимоги до звіту

Звіт оформити за структурою: тема, мета, вихідні дані, таблиці/розрахунки, висновок, відповіді на контрольні питання.

Варіанти виконання робіт

Варіант 1

$$U_{\text{пр}} = 56, W = 14, K = 0,03, tg\delta = 0,003$$

Варіант 2

$$U_{\text{пр}} = 44, W = 38, K = 0,04, tg\delta = 0,007$$

Варіант 3

$$U_{\text{пр}} = 52, W = 18, K = 0,12, tg\delta = 0,006$$

Варіант 4

$$U_{\text{пр}} = 35, W = 16, K = 0,05, tg\delta = 0,004$$

Варіант 5

$$U_{\text{пр}} = 41, W = 28, K = 0,09, tg\delta = 0,009$$

Варіант 6

$$U_{\text{пр}} = 60, W = 10, K = 0,08, tg\delta = 0,004$$

Варіант 7

$$U_{\text{пр}} = 46, W = 22, K = 0,15, tg\delta = 0,010$$

Варіант 8

$$U_{\text{пр}} = 33, W = 55, K = 0,07, tg\delta = 0,012$$

Варіант 9

$$U_{\text{пр}} = 50, W = 19, K = 0,18, tg\delta = 0,008$$

Варіант 10

$$U_{\text{пр}} = 39, W = 17, K = 0,22, tg\delta = 0,011$$

Варіант 11

$$U_{\text{пр}} = 58, W = 26, K = 0,05, tg\delta = 0,006$$

Варіант 12

$$U_{\text{пр}} = 47, W = 12, K = 0,06, tg\delta = 0,009$$

Варіант 13

$$U_{\text{пр}} = 29, W = 65, K = 0,20, tg\delta = 0,015$$

Варіант 14

$$U_{\text{пр}} = 54, W = 21, K = 0,11, tg\delta = 0,005$$

Варіант 15

$$U_{\text{пр}} = 42, W = 34, K = 0,16, tg\delta = 0,013$$

* Умовні нормативні межі вказані в прикладі виконання роботи.