МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра «Матеріалознавство і технологія матеріалів»

Козішкурт Є. М.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни «Електротехнічні матеріали»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
які обрали дисципліну із загальноуніверситетського каталогу
вибіркових освітніх компонентів

Одеса, 2024

Конспект лекцій з дисципліни «Електротехнічні матеріали» розроблено Козішкуртом Євгеном Миколайовичем — к.т.н. (PhD), старшим викладачем кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів» Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету. Конспект призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які обрали дисципліну із загальноуніверситетського каталогу вибіркових освітніх компонентів.

Конспект лекцій схвалено кафедрою «Матеріалознавство і технологія матеріалів» «11» вересня 2024 р. Протокол №2.

Анотація. У конспекті систематизовано відомості про діелектричні, провідникові, напівпровідникові та магнітні матеріали, їх властивості й закономірності зміни характеристик під дією температури, електричного поля, вологи та механічних навантажень. Основний прикладний акцент зроблено на матеріалах суднових кабельних мереж, електричних машин, трансформаторів, комутаційної апаратури, систем автоматизації та силової електроніки з урахуванням вологості, сольового забруднення, корозії, вібрації та температурних циклів.

Ключові слова: електротехнічні матеріали, діелектрики, провідники, напівпровідники, магнітні матеріали, суднове електрообладнання, суднові кабелі, електроізоляція, корозія, силова електроніка.

ЗМІСТ

Вступ 4
Тема 1. Діелектричні матеріали 7
Тема 2. Провідникові матеріали 20
Тема 3. Напівпровідникові матеріали 31
Тема 4. Магнітні матеріали 41
Тема 5. Застосування електротехнічних матеріалів в електротехніці 52
Підсумкові контрольні питання 69
Українсько-англійський термінологічний мінімум 71
ЛІТЕРАТУРА 73

ВСТУП

Електротехнічні матеріали є матеріальною основою будь-якої електроенергетичної, електромеханічної та електронної системи. Властивості провідника визначають втрати електричної енергії і нагрівання; властивості ізоляції — допустимий рівень напруги та довговічність; магнітні матеріали — габарити, втрати та коефіцієнт корисної дії електричних машин і трансформаторів; напівпровідникові матеріали — можливості керування, перетворення та контролю електричної енергії.

Для морського транспорту правильний вибір матеріалу має особливе значення. Суднове обладнання працює в умовах, де одночасно діють електричні, теплові, механічні та кліматичні фактори. Волога і конденсація знижують поверхневий опір ізоляції; сольові відкладення підвищують небезпеку струмів витоку і корозії; вібрація може послаблювати контактні з’єднання та прискорювати механічне руйнування ізоляції; підвищена температура прискорює старіння полімерів та змінює характеристики напівпровідників.

Сучасна суднова електроенергетична система включає генератори, головний і аварійний розподільні щити, кабельну мережу, електроприводи допоміжних механізмів, трансформатори, перетворювачі частоти, джерела безперебійного живлення, системи автоматики, зв’язку та навігації. В усіх цих вузлах використовуються матеріали різних класів, причому працездатність обладнання визначається не тільки властивостями кожного матеріалу окремо, а й сумісністю матеріалів у конструкції.



Рисунок 1 — Основні класи електротехнічних матеріалів

Основні критерії вибору матеріалів для суднового електрообладнання

- електричні характеристики: питомий опір, електрична міцність, діелектричні втрати, магнітна проникність, коерцитивна сила;
- теплові характеристики: допустима робоча температура, теплопровідність, теплоємність, температурний коефіцієнт властивостей;
- механічні характеристики: міцність, пластичність, втомна довговічність, стійкість до вібрації та удару;
- стійкість до вологи, морської атмосфери, мастил, палив, очищувальних засобів;
- пожежна безпека, димо- і газоутворення;
- технологічність виготовлення, монтажу, ремонту і з’єднання;
- вартість життєвого циклу, доступність і ремонтопридатність.

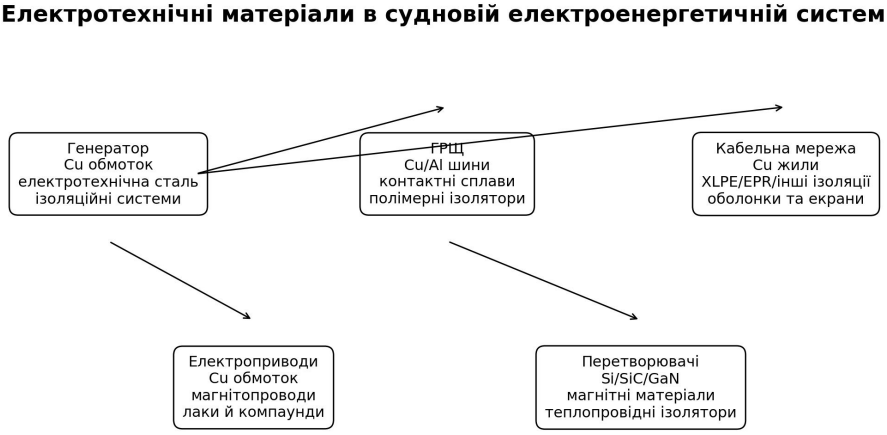


Рисунок 2 — Приклади електротехнічних матеріалів у судновій електроенергетичній системі

Предмет дисципліни охоплює не лише перелік матеріалів, а й причинно-наслідковий зв’язок між їх будовою, властивостями та поведінкою в реальному виробі. Для інженера важливо вміти перейти від вимоги до обладнання — допустимого нагрівання, електричної міцності, ресурсу, ремонтопридатності — до набору властивостей матеріалу, які забезпечують цю вимогу. У судновій техніці такий підхід особливо важливий, оскільки відмова одного елемента може впливати на енергопостачання, керованість або безпеку судна.

Експлуатаційне середовище судна формує комплексний вплив. Температура змінює електричний опір металів, рухливість носіїв у напівпровідниках і швидкість старіння полімерної ізоляції. Волога та сольові аерозолі знижують поверхневий опір ізоляційних деталей і прискорюють корозію контактів. Вібрація та циклічні деформації можуть послаблювати клемні з’єднання, пошкоджувати пайки і сприяти розвитку мікротріщин. Тому матеріал, який добре працює у лабораторних умовах, не обов’язково є оптимальним для машинного відділення, відкритої палуби або приміщення з підвищеною вологістю.

ТЕМА 1. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Діелектрики — це матеріали, у яких за звичайних умов концентрація вільних носіїв заряду значно менша, ніж у провідниках. Їх основна функція в електротехнічних конструкціях полягає у розділенні струмопровідних частин, формуванні електричного поля та запобіганні небажаному проходженню струму. У судновому обладнанні діелектрики входять до складу кабелів, обмоток електричних машин, трансформаторів, розподільних пристроїв, електронних модулів, датчиків і систем електроруху.

1.1. Загальні відомості та класифікація діелектриків

За агрегатним станом діелектрики поділяють на газоподібні, рідкі та тверді. За хімічною природою — на органічні та неорганічні. За будовою тверді діелектрики можуть бути аморфними, кристалічними, волокнистими, шаруватими або композиційними. Для інженерного вибору враховують також полярність молекул, гігроскопічність, теплостійкість, горючість, механічну міцність, стійкість до електричної дуги та поверхневого трекінгу.

Ознака	Групи	Приклади та застосування
Агрегатний стан	гази; рідини; тверді	повітря; ізоляційні рідини; полімери, кераміка, скло
Хімічна природа	органічні; неорганічні	полімерні плівки і гуми; слюда, кераміка, скло
Походження	природні; синтетичні	слюда; епоксидні смоли, силікони
Призначення	кабельні; обмотувальні; просочувальні; конструкційні	ізоляція жил; емалі; лаки; ізолятори, вводи

Ідеальний діелектрик не пропускав би постійний струм і не розсіював би енергію в змінному полі. Реальні матеріали мають кінцеву електропровідність, діелектричні втрати, неоднорідності, вологу та дефекти. Тому в експлуатації

важливо контролювати не лише паспортну електричну міцність, а й стан поверхні, температуру, зволоження та забруднення.

1.2. Поляризація діелектриків

Поляризацією називають процес зміщення зв’язаних електричних зарядів або орієнтації електричних диполів під дією зовнішнього електричного поля. Поляризація визначає діелектричну проникність і частково — діелектричні втрати матеріалу.

Основні механізми поляризації: електронна, іонна, дипольно-орієнтаційна та міжфазна. Електронна поляризація пов’язана зі зміщенням електронної оболонки атома відносно ядра і є найшвидшим механізмом. Іонна виникає в речовинах з іонним характером зв’язку. Дипольна зумовлена поворотом полярних молекул у напрямку поля. Міжфазна пов’язана з накопиченням заряду на межах фаз, включеннях, порах і структурних неоднорідностях.

Вид поляризації	Фізичний механізм	Характерна особливість
Електронна	деформація електронних оболонок	дуже швидка; властива практично всім діелектрикам
Іонна	відносне зміщення позитивних і негативних іонів	характерна для іонних кристалів
Дипольна	орієнтація молекулярних диполів	суттєво залежить від температури та частоти
Міжфазна	накопичення зарядів на межах неоднорідностей	важлива в композитах, пористих і зволожених матеріалах

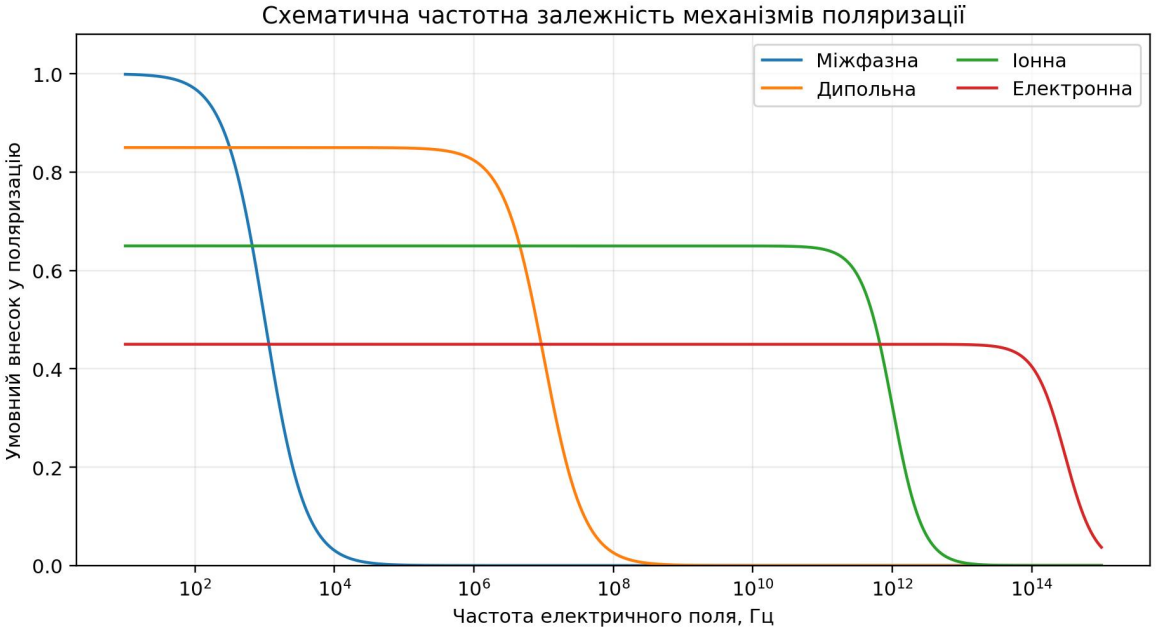


Рисунок 3 — Якісне уявлення про частотну область дії механізмів поляризації

Якщо частота електричного поля зростає настільки, що певний механізм не встигає слідувати за зміною поля, його внесок у загальну поляризацію зменшується. У перехідній області часто спостерігається зростання втрат, оскільки частина енергії витрачається на перебудову структури або орієнтацію диполів.

1.3. Діелектрична проникність

Відносна діелектрична проникність εr показує, у скільки разів ємність конденсатора з даним діелектриком більша за ємність такого самого конденсатора у вакуумі. Для плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S / d,$$

де C — ємність, ε_0 — електрична стала, εr — відносна діелектрична проникність, S — площа електродів, d — товщина діелектрика.

Температурна залежність εr визначається типом поляризації та структурою матеріалу. У полярних матеріалах зміна рухливості диполів може давати суттєвий ефект. Частотна залежність особливо помітна там, де присутні повільні механізми поляризації. Тому значення εr слід порівнювати лише за однакових або чітко зазначених умов вимірювання.

Практичне значення для судна. Зміна діелектричних властивостей із температурою і зволоженням впливає на кабельну ізоляцію, обмотки машин, високочастотні електронні кола та датчики. У машинному відділенні температурний режим і локальне зволоження можуть істотно відрізнятися від умов лабораторного випробування.

1.4. Електропровідність, об’ємний і поверхневий опір

Реальний діелектрик має малу, але ненульову електропровідність. У твердих матеріалах розрізняють об’ємний струм, що проходить крізь товщу матеріалу, і поверхневий струм, що протікає вздовж поверхні. Об’ємна електропровідність залежить від складу, дефектів, домішок, температури і вологи. Поверхнева електропровідність особливо чутлива до забруднення та утворення тонкої плівки вологи.

$$R = \rho \cdot l / S,$$

де R — електричний опір; ρ — питомий об’ємний опір; l — довжина шляху струму; S — площа поперечного перерізу.

Для ізоляційних матеріалів практичне значення мають питомий об’ємний опір ρv і питомий поверхневий опір ρs. Їх визначають за стандартизованими схемами електродів, щоб геометрія зразка була врахована коректно. Це безпосередньо пов’язано з передбаченою робочою програмою практичною роботою з визначення об’ємного та поверхневого питомих опорів твердих діелектриків.

Із підвищенням температури провідність багатьох діелектриків зростає, а опір зменшується. Волога часто діє ще сильніше, оскільки вода та розчинені в ній іонні домішки утворюють провідні шляхи. Для суднової ізоляції це критично: сольовий аерозоль, конденсат і пил можуть знижувати поверхневий опір навіть тоді, коли об’ємні властивості полімеру залишаються задовільними.

1.5. Діелектричні втрати

У змінному електричному полі частина електричної енергії перетворюється на тепло. Ці втрати називають діелектричними. Вони пов’язані з провідністю, релаксаційною поляризацією, неоднорідністю та іншими механізмами. Для характеристики використовують кут діелектричних втрат δ і тангенс цього кута tanδ.

$$P \approx \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan\delta,$$

де P — активна потужність втрат у діелектрику, $\omega = 2\pi f$ — кутова частота, C — ємність, U — діюче значення напруги. Формула показує, чому зростання частоти, напруги або tanδ може суттєво підвищувати тепловиділення.

У суднових електричних машинах та кабельних системах надмірні діелектричні втрати означають додатковий нагрів і прискорення старіння. Для силової електроніки проблема ускладнюється тим, що імпульсні перетворювачі формують напругу з високою швидкістю зміни, тому локальні електричні поля та частотні складові можуть відрізнятися від синусоїдального режиму мережі.

1.6. Пробій діелектриків

Пробій — втрата діелектриком ізоляційних властивостей під дією електричного поля. Для твердих діелектриків розглядають електричний, тепловий, електрохімічний та комбінований механізми. Для газів важливі процеси ударної іонізації і розвитку самостійного розряду. Для рідких діелектриків суттєву роль відіграють домішки, газові включення, вода та локальні неоднорідності поля.

$$Eпр = Uпр / d.$$

Електрична міцність Eпр умовно визначається як відношення напруги пробою Uпр до товщини діелектрика d. Це співвідношення корисне для порівняння, але не означає, що пробивна напруга завжди прямо пропорційна товщині. На результат впливають форма електродів, дефекти, тривалість прикладення напруги, температура, частота, вологість та стан поверхні.

Тепловий пробій розвивається, коли тепловиділення перевищує здатність конструкції відводити тепло. Підвищення температури знижує опір, струм зростає, втрати збільшуються — виникає позитивний зворотний зв’язок. У герметичних або погано вентильованих суднових електротехнічних шафах контроль теплового режиму є принципово важливим.

1.7. Теплові, механічні, хімічні та вологісні властивості

Електроізоляційний матеріал у реальній конструкції одночасно є механічним і тепловим елементом. Він має витримувати стиск, згин, вібрацію, температурне розширення, контакт із лаками, мастилами, паливом або очищувальними речовинами. Матеріали з високою електричною міцністю можуть виявитися непридатними, якщо вони крихкі, гігроскопічні або нестійкі до робочої температури.

Властивість	Чому важлива	Морський приклад
Вологостійкість	волога підвищує поверхневу та об’ємну провідність	кабельні вводи, клемні коробки, двигуни палубних механізмів
Теплостійкість	визначає допустиму температуру та швидкість старіння	обмотки генераторів, трансформаторів, двигунів
Вібраційна стійкість	запобігає тріщинам, стиранню та послабленню кріплень	обладнання біля головних механізмів
Хімічна стійкість	зберігає властивості при контакті з маслами та паливом	машинні приміщення
Дугостійкість і трекінгостійкість	зменшує ризик формування провідних доріжок	розподільні щити, контактори, ізолятори

1.8. Основні групи електроізоляційних матеріалів

Полімерні матеріали широко застосовують завдяки невеликій масі, технологічності та можливості регулювати властивості складом. До них належать поліетиленові, зшиті поліетиленові, еластомерні, епоксидні, поліестерні, поліімідні, силіконові та інші системи. Конкретна рецептура визначає теплостійкість, гнучкість, димовиділення, стійкість до полум'я, мастил та морського середовища.

Керамічні матеріали мають високу теплостійкість і хімічну стабільність, але зазвичай є крихкими. Скло та склотекстоліти поєднують електроізоляційні властивості з достатньою механічною міцністю. Слюда цінується за високу електричну і теплостійкість та використовується у відповідальних ізоляційних системах електричних машин. Лаки й компаунди заповнюють пори, фіксують обмотки, підвищують вологостійкість і покращують тепловий контакт.

Газоподібні діелектрики використовуються як природні або спеціально організовані ізоляційні середовища. Найпоширенішим є повітря. Для суднових умов важливо враховувати, що забруднення поверхонь і конденсація можуть спричиняти поверхневі розряди за напруг, менших за очікувані для чистої сухої ізоляції.

1.9. Діелектрики в судновому електрообладнанні

У суднових кабелях ізоляційна система повинна забезпечувати електричну міцність, механічну гнучкість, термічну стійкість і сумісність з оболонкою та захисними шарами. Матеріал ізоляції обирають не самостійно, а як частину кабельної конструкції, для якої нормуються також поширення полум'я, димовиділення, токсичність продуктів горіння, стійкість до мастил та інші показники залежно від призначення і зони прокладання.

В електричних машинах ізоляційна система включає емаль проводу, пазову ізоляцію, міжфазні прокладки, бандажі, просочувальні лаки або смоли. Робота

системи визначається найслабшим місцем: локальний дефект, порожнина або ослаблення просочення може створити підвищену напруженість поля та перегрів.

У трансформаторах діелектрик одночасно має виконувати електричну й теплову функцію. У сухих трансформаторах це полімерні та композиційні системи; у рідинних — тверда ізоляція працює разом із діелектричною рідиною. На судні додатково важливими стають вібрація, обмежений простір, пожежна безпека та вимоги до технічного обслуговування.

Приклад. Для електродвигуна палубної лебідки небезпечним є не тільки перегрів обмотки під навантаженням, а й проникнення вологи через ущільнення, сольове забруднення клемної коробки та тривалі періоди простою. Після простою стан ізоляції оцінюють за процедурою технічного обслуговування обладнання, а не лише за фактом попередньої справності.

1.10. Старіння, пошкодження та діагностика ізоляції

Старінням називають поступову необоротну зміну властивостей матеріалу під дією температури, електричного поля, механічних напружень, вологи, кисню та хімічних агентів. У полімерних матеріалах це може проявлятися в окисненні, розриві або зшиванні макромолекул, втраті пластифікатора, появі мікротріщин і крихкості.

Діагностика ізоляції може включати вимірювання опору ізоляції, ємності, tanδ, часткових розрядів, термографію, візуальний контроль, випробування підвищеною напругою та інші методи. Вибір методу залежить від типу обладнання, рівня напруги, конструкції і вимог виробника або нормативних документів.

Для морської експлуатації важливий трендовий підхід: одиничне вимірювання має обмежену цінність без порівняння з попередніми результатами, температурою, вологістю та режимом роботи. Поступове зниження опору ізоляції або зростання температури може вказувати на забруднення, старіння, ослаблення вентиляції або перевантаження.

1.11. Електроізоляційна система як комплекс матеріалів

У реальному електротехнічному виробі ізоляція майже ніколи не складається з одного матеріалу. Наприклад, обмотка суднового електродвигуна може включати емалеве покриття проводу, пазову ізоляцію, міжфазні прокладки, скловолоконні бандажі, просочувальну смолу та захисний лак. Надійність такої системи визначається не лише властивостями кожного компонента, а й їх сумісністю: коефіцієнтами теплового розширення, адгезією, стійкістю до вологи та мастил, здатністю відводити тепло й зберігати механічну цілісність при вібрації.

При циклічному нагріванні різні матеріали розширюються неоднаково. На межах шарів виникають механічні напруження, які з часом можуть спричинити відшарування, тріщини або порушення герметичності. Тому оцінювати потрібно не окремий «найкращий» діелектрик, а всю систему в умовах реального температурного та механічного циклу. Для суднових машин це особливо актуально через часті пуски, зміну навантаження, тривалу роботу під навантаженням і вібрацію від механізмів.

1.12. Волога, сольові забруднення та поверхневі розряди

Вода впливає на електроізоляційні матеріали двома основними шляхами: поглинається об’ємом матеріалу або утворює плівку на його поверхні. Якщо на поверхні присутні солі, пил або продукти корозії, тонка волога плівка стає значно провіднішою. У результаті зростає струм витоку, локальний нагрів і ризик утворення поверхневих провідних доріжок. Такий процес небезпечний для клемних коробок, ізоляторів, шинних опор і друкованих плат, розташованих у вологих приміщеннях.

Під час проєктування та експлуатації важливими стають довжина шляху струму по поверхні, геометрія ребер ізолятора, якість герметизації, дренаж конденсату й чистота поверхні. Просте збільшення товщини ізоляції не усуває ризик поверхневого перекриття, якщо забруднена поверхня залишається вологою.

Технічне обслуговування тому включає очищення, сушіння, контроль ущільнень і перевірку стану вентиляції електротехнічних приміщень.

1.13. Часткові розряди та імпульсні перенапруги

Частковий розряд — локальний електричний розряд, який перекриває лише частину ізоляційного проміжку. Він може виникати в газових включеннях, порожнинах, на межах матеріалів або біля гострих електродів. Один розряд має малу енергію, однак багаторазова дія поступово руйнує полімер, утворює ерозію та продукти хімічного розкладання. З часом локальний дефект може перетворитися на наскрізний пробій.

Сучасні частотні перетворювачі формують напругу імпульсним методом. Круті фронти імпульсів створюють додаткове електричне навантаження на міжвиткову ізоляцію обмоток двигунів і на кабельну систему. Тому при модернізації суднового електропривода недостатньо врахувати лише номінальну напругу двигуна: необхідно оцінити сумісність ізоляційної системи з живленням від перетворювача, довжину кабелю, форму імпульсів та рекомендації виробника.

1.14. Матеріали ізоляції суднових кабелів

Судновий кабель є багатошаровою конструкцією. Електрична ізоляція повинна зберігати міцність при нагріванні, бути технологічною під час монтажу та сумісною з оболонкою. У сучасних кабелях застосовують термопластичні й термореактивні полімери, зокрема поліетиленові та еластомерні системи. Вибір конкретного матеріалу визначається робочою напругою, температурою, гнучкістю, пожежними характеристиками, стійкістю до мастил, палива, вологи та умов прокладання.

IEC 60092-350 встановлює загальні конструкційні вимоги й методи випробувань для суднових силових, контрольних та інструментальних кабелів із мідними провідниками, а IEC 60092-360 — вимоги до ізоляційних і оболонкових

матеріалів для суднових та офшорних кабелів. Для навчального вибору матеріалу важливо розуміти сам принцип: відповідність кабелю морським умовам визначається комплексом властивостей конструкції, а не лише назвою полімеру.

1.15. Пожежна поведінка електроізоляційних матеріалів

Для судна пожежні характеристики кабельних матеріалів мають принципове значення через замкнені приміщення, протяжні кабельні траси та необхідність зберігати працездатність критичних систем. Під час горіння полімер може поширювати полум’я, виділяти дим і корозійно активні або токсичні продукти. Тому при виборі кабелю оцінюють не одну властивість, а сукупність показників, що визначають поведінку кабельної системи в аварійній ситуації.

Матеріали з низьким димо- та газовиділенням застосовують там, де це передбачено вимогами до конкретної системи. Водночас позначення «безгалогенний» саме по собі не означає автоматично найкращу механічну, маслостійку або термічну характеристику. Інженерний вибір завжди є компромісом між електричними, механічними, пожежними та експлуатаційними властивостями.

Фактор	**Механізм впливу на діелектрик**	**Типовий наслідок у судновій експлуатації**
Підвищена температура	Прискорення хімічного старіння, зниження опору, розм’якшення полімерів	Скорочення ресурсу ізоляції обмоток і кабелів
Волога та конденсат	Зростання іонної провідності, поглинання води	Зменшення опору ізоляції, струми витоку
Сольове забруднення	Утворення провідної поверхневої плівки	Трекінг, поверхневі перекриття
Вібрація	Мікротріщини, тертя, ослаблення кріплень	Пошкодження пазової ізоляції, клемних вводів
Імпульсна напруга	Підвищені локальні напруженості поля	Часткові розряди, міжвиткові пошкодження

Завдання для самостійної роботи до теми 1

1. Поясніть, чому збільшення товщини ізоляції не завжди вирішує проблему поверхневого перекриття у вологому сольовому середовищі.
2. Складіть перелік матеріалів ізоляційної системи асинхронного електродвигуна та для кожного визначте основний вид навантаження.
3. Порівняйте вимоги до ізоляції кабелю, прокладеного в сухому електротехнічному приміщенні, і кабелю на відкритій палубі.
4. Поясніть, чому після встановлення частотного перетворювача необхідно повторно оцінити електричне навантаження на ізоляцію двигуна.

Висновки до теми 1

- Діелектрик у реальному обладнанні повинен одночасно забезпечувати електричну, теплову, механічну та середовищну стійкість.
- Поляризація визначає діелектричну проникність і частотну поведінку матеріалу.
- Волога й забруднення особливо сильно впливають на поверхневу електропровідність — це один із ключових ризиків морського середовища.
- Пробій може мати електричний, тепловий або комбінований характер.
- Для суднової техніки важливо оцінювати ізоляційну систему як єдину конструкцію.

Контрольні питання до теми 1

1. Що називають поляризацією діелектрика? Назвіть основні механізми поляризації.
2. Як частота електричного поля впливає на різні механізми поляризації?
3. Що характеризує відносна діелектрична проникність?
4. Чим відрізняються об’ємна та поверхнева електропровідність?
5. Чому сольове забруднення особливо небезпечне для поверхні ізоляторів?

6. Що характеризує tanδ і чому його зростання небажане?

7. Назвіть основні механізми пробою твердих діелектриків.

8. Які властивості ізоляційних матеріалів, окрім електричної міцності, важливі для суднового обладнання?

9. Наведіть приклади полімерних, неорганічних та композиційних діелектриків.

10. Які методи можуть застосовуватися для контролю стану ізоляції електрообладнання?

ТЕМА 2. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Провідникові матеріали призначені для передавання електричного струму, формування електричних контактів, створення резистивних і нагрівальних елементів. Найважливішими властивостями є низький або, для спеціальних сплавів, задано високий питомий електричний опір, достатня механічна міцність, технологічність з’єднання, корозійна стійкість та стабільність характеристик у робочому діапазоні температур.

2.1. Фізична природа електропровідності металів

У металах валентні електрони утворюють систему колективізованих носіїв заряду. Під дією електричного поля вони набувають напрямленої швидкості, що накладається на хаотичний тепловий рух. Електричний опір виникає через розсіювання електронів на теплових коливаннях кристалічної решітки, дефектах, домішках, межах зерен та інших неоднорідностях.

$$R = \rho \cdot l / S, \quad P_{вт} = I^2 R,$$

де R — опір провідника, ρ — питомий опір, l — довжина, S — площа поперечного перерізу, I — струм, Рвт — джоулеві втрати. Зростання довжини кабелю збільшує опір і падіння напруги, а недостатній переріз різко підвищує теплові втрати.

2.2. Температурна залежність електричного опору

Для більшості металів у помірному температурному діапазоні опір зростає з температурою. Наближено використовують лінійну залежність:

$$R(T) = R(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)],$$

де α — температурний коефіцієнт опору. Лінійна модель придатна лише в обмеженому діапазоні; для точних розрахунків застосовують довідкові або стандартизовані дані.

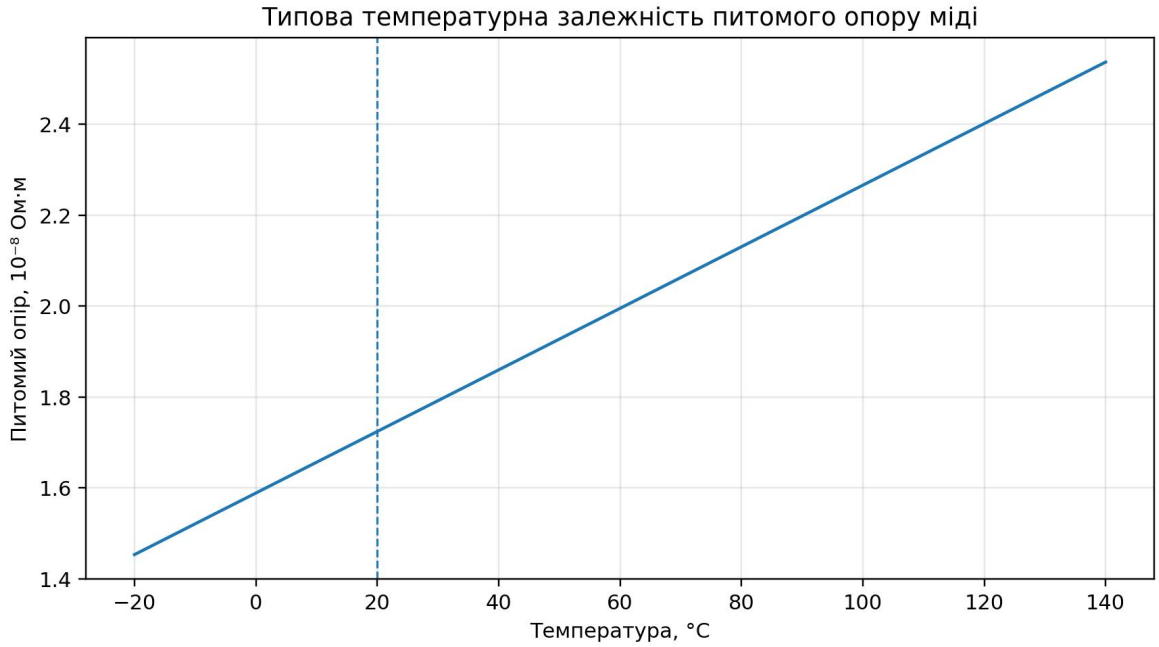


Рисунок 4 — Приклад температурної залежності питомого опору міді

Збільшення опору при нагріванні означає, що під час тривалого навантаження втрати можуть перевищувати значення, розраховані за опором при 20 °C. У кабельних лініях це враховують при виборі перерізу, допустимого струму та оцінці падіння напруги. У суднових приміщеннях температура навколишнього середовища, щільність прокладання кабелів і вентиляція впливають на фактичну температуру провідника.

Зв’язок із практичною роботою. Робочою програмою передбачено дослідження температурної залежності питомого опору провідникових матеріалів. Під час обробки експериментальних даних важливо відокремлювати властивість матеріалу від опору конкретного зразка, що залежить від довжини та перерізу.

2.3. Мідь та її сплави

Мідь є основним провідниковим матеріалом для обмоток електричних машин, кабельних жил, шин, контактних і з’єднувальних елементів. Її перевагами є висока електро- і теплопровідність, добра пластичність, придатність до паяння, опресування та інших способів з’єднання.

Чиста мідь має нижчу механічну міцність, ніж багато конструкційних сплавів, тому для окремих задач використовують мідні сплави. При цьому легування майже завжди збільшує питомий електричний опір, отже інженерний вибір є компромісом між механічною міцністю і провідністю.

Для морського середовища важливі стан поверхні та якість контактного з’єднання. Окисні плівки, волога й солі можуть збільшувати контактний опір. У кабелях часто застосовують багатодротяні жили, а залежно від конструкції — поверхневі покриття окремих дротів. Конкретне виконання визначається стандартом і документацією виробника.

2.4. Алюміній та алюмінієві сплави

Алюміній має значно меншу густину, ніж мідь, і є важливим електротехнічним матеріалом. Його питомий опір вищий, тому для однакового електричного опору потрібний більший переріз. Зменшення маси може бути перевагою, але більший геометричний розмір, механічні властивості і технологія контактів повинні оцінюватися одночасно.

На поверхні алюмінію швидко утворюється оксидна плівка, що захищає метал від подальшого окиснення, але ускладнює створення низькоомних контактів. З’єднання алюмінієвих провідників потребують технологій та арматури, призначених саме для цього матеріалу.

При безпосередньому контакті різнорідних металів у присутності електроліту можливе гальванічне корозійне ушкодження. На судні, де ймовірні конденсат і сольове забруднення, конструкція контактних переходів повинна мінімізувати проникнення вологи і небажані електрохімічні пари.

2.5. Сплави високого питомого опору

Для резисторів, шунтів, нагрівальних елементів і деяких датчиків застосовують сплави з підвищеним питомим опором і стабільним температурним

коефіцієнтом. Прикладами є нікель-хромові, мідно-нікелеві та інші спеціальні системи. Вибір залежить від необхідної температури, стабільності, механічної міцності, стійкості до окиснення та технології виготовлення.

У судновому обладнанні резистивні елементи зустрічаються в пускових і гальмівних колах, системах підігріву, вимірювальних шунтах, датчиках і силовій електроніці. Висока температура може змінювати властивості матеріалу, тому важливі не лише номінальний опір, а й допустима потужність розсіювання та умови охолодження.

2.6. Контактні матеріали та контактний опір

Електричний контакт є локальною зоною проходження струму між двома провідними поверхнями. Реальна площа контакту значно менша за видиму, оскільки поверхні дотикаються через мікровиступи. Контактний опір залежить від сили притискання, твердості матеріалів, стану поверхні, оксидних і забруднювальних плівок, температури та струму.

Комутаційні контакти працюють у складніших умовах: під час розмикання можливе виникнення електричної дуги, що спричиняє локальне плавлення, ерозію та перенесення матеріалу. Тому контактні матеріали мають поєднувати достатню електропровідність з дугостійкістю, зносостійкістю та стабільністю поверхні.

Для контакторів, автоматичних вимикачів і клемних з’єднань на судні небезпечним є поєднання вібрації та корозійного середовища. Послаблення механічного затиску збільшує контактний опір, нагрівання прискорює окиснення, а окиснення ще більше підвищує опір. Тому контроль температури і стану поверхні є частиною профілактики.

2.7. Припої та матеріали електричних з’єднань

Електричні з’єднання виконують механічним затиском, опресуванням, паянням, зварюванням та іншими способами. Матеріал з’єднання повинен

забезпечувати низький і стабільний перехідний опір, механічну міцність, корозійну стійкість і сумісність з провідниками. В електронній апаратурі важливі також термоциклічна стійкість і втома паяних з’єднань.

В умовах вібрації слабке паяне або механічне з’єднання може руйнуватися навіть без перевищення електричного навантаження. На судні конструкція повинна забезпечувати розвантаження кабелю від механічного натягу, фіксацію джгутів та захист від проникнення вологи.

2.8. Корозія провідникових матеріалів

Корозія — самочинне руйнування металів унаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії з середовищем. Для електрообладнання корозія небезпечна не лише втратою перерізу, а й зростанням контактного опору, порушенням екранування, ослабленням механічних з’єднань і появою нестабільних перехідних процесів.

Морська атмосфера характеризується підвищеною вологістю і наявністю солей. За наявності тонкої електролітної плівки умови електрохімічної корозії різко полегшуються. Захист забезпечують вибором матеріалів, покриттями, герметизацією, дренажем, конструктивним розділенням несумісних металів, підтриманням чистоти і регламентним оглядом.

2.9. Провідники суднових кабелів, шин і обмоток

У судновій кабельній мережі провідник повинен забезпечувати допустимий нагрів, механічну гнучкість, необхідне падіння напруги та надійне з’єднання з апаратурою. При виборі кабелю враховують не лише переріз провідника, а й тип ізоляції, спосіб прокладання, групування, температуру навколишнього середовища, короткочасні та аварійні режими.

У шинопроводах і розподільних щитах великі струми створюють значні електродинамічні сили під час короткого замикання. Отже, матеріал шин і

конструкція кріплень повинні мати достатню механічну та термічну стійкість. В обмотках генераторів і двигунів перегрів міді безпосередньо підвищує температуру ізоляції та прискорює її старіння.

2.10. Падіння напруги та втрати в кабельній лінії

Для навчальної оцінки падіння напруги в симетричній трифазній лінії застосовують залежність, що враховує активний і реактивний опори:

$$\Delta U \approx \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi).$$

Якщо довжина траси збільшується вдвічі, активний опір провідника приблизно подвоюється. Збільшення перерізу, навпаки, зменшує опір. У реальному проєктному розрахунку враховують дані конкретного кабелю, температуру, спосіб прокладання, допустимий струм і вимоги чинних правил.

2.11. Порівняльна характеристика основних провідникових матеріалів

Матеріал	Переваги	Обмеження	Типове застосування
Мідь	висока електро- і теплопровідність; пластичність	маса, вартість, окиснення поверхні	кабелі, обмотки, шини, контакти
Алюміній	мала густина; доступність	вищий опір; складніші контакти; оксидна плівка	окремі шини та провідники за проєктом
Мідні сплави	краща механічна міцність	нижча провідність, ніж у чистої міді	пружні та контактні елементи
Нікель-хромові сплави	високий опір; теплостійкість	не призначені для мінімізації втрат	нагрівачі, резистивні елементи

2.12. Луджена мідь і захист провідників

Мідь має високу електропровідність і тому є основним матеріалом провідників суднових кабелів, шин та обмоток. Проте її поверхня у вологому та хімічно активному середовищі окиснюється, а в присутності солей процеси корозії прискорюються. Для підвищення стійкості багатодротяних жил та контактних зон може застосовуватися лудіння. Тонкий олов'яний шар не замінює герметизацію, але зменшує безпосередню взаємодію міді з агресивним середовищем і полегшує окремі технологічні операції.

Особливо важливо захищати місця, де капілярне проникнення вологи можливе вздовж багатодротяної жили. Якщо морська вода потрапила під оболонку, корозія може розвиватися на значній довжині кабелю. Тому якість кабельних вводів, ущільнень, кінцевих муфт і монтажу є такою ж важливою, як матеріал провідника.

2.13. Контактний опір і тепловий режим з'єднань

Електричний контакт відрізняється від суцільного провідника тим, що струм проходить через обмежену кількість мікроскопічних площадок фактичного дотику. Оксидні плівки, забруднення, недостатня сила притискання та деформація поверхонь збільшують перехідний опір. Виділення тепла $P = I^2R$ локалізується у невеликій зоні, тому навіть відносно невелике збільшення опору може спричинити значний перегрів клеми.

На судні контактні з'єднання додатково зазнають вібрації та температурних циклів. Ослаблення болтового з'єднання підвищує опір, нагрів посилює окиснення і релаксацію притискання, після чого дефект розвивається прискорено. Практичними ознаками є зміна кольору металу, потемніння ізоляції біля клеми, запах перегрітого полімеру та локальна температурна аномалія під час термографії.

2.14. Гальванічна корозія різнорідних металів

Якщо два різнорідні метали електрично з’єднані та одночасно контактують з електролітом, може виникнути гальванічна пара. Морська вода є ефективним електролітом, тому неправильне поєднання матеріалів у клемах і корпусних деталях може різко прискорити корозію менш благородного металу. Ризик залежить від електрохімічної різниці, співвідношення площ, стану покриття та доступу електроліту.

Особливої уваги потребують переходи мідь—алюміній. Безпосереднє з’єднання за наявності вологи може сприяти корозії й зростанню контактного опору. Для таких переходів застосовують спеціальні біметалеві або сертифіковані перехідні елементи, контактні матеріали та технологію монтажу, передбачену виробником. У навчальній задачі слід оцінювати не лише електропровідність, а й електрохімічну сумісність пари матеріалів.

2.15. Вибір перерізу провідника як матеріалознавча задача

Переріз кабелю не можна визначати тільки з умови допустимого струму. Матеріал провідника та ізоляції одночасно впливають на нагрівання, допустиму температуру, падіння напруги, здатність витримати струм короткого замикання і механічну міцність. У пучках кабелів тепловідведення гірше, а підвищена температура довкілля зменшує тепловий резерв. Тому один і той самий мідний провідник може мати різне допустиме навантаження залежно від способу прокладання та конструкції кабелю.

Для суднової кабельної лінії також враховують довжину траси. Падіння напруги $\Delta U = I \cdot R$ для постійного струму або відповідний комплексний вираз для змінного струму може стати визначальним при значній довжині. Збільшення перерізу знижує втрати, але підвищує масу, вартість і мінімальний радіус вигину. Таким чином, вибір матеріалу й геометрії є оптимізаційною задачею.

2.16. Провідники у великих струмових системах

У головних розподільних щитах і потужних електроприводах застосовують шини та кабельні з’єднання великих перерізів. Тут зростає значення механічної міцності, теплового розширення, електродинамічних сил при коротких замиканнях і якості поверхні контактів. Конструкція шин повинна забезпечувати відведення тепла й одночасно витримувати механічні навантаження, що виникають під час аварійних струмів.

На підвищених частотах і при імпульсних струмах розподіл струму по перерізу стає нерівномірним через поверхневий ефект і ефект близькості. Для звичайної мережевої частоти ці явища можуть бути другорядними для невеликих провідників, але стають помітнішими у масивних шинах, трансформаторних обмотках і високочастотних вузлах перетворювальної техніки.

Матеріал/рішення	**Переваги**	**Обмеження**	**Типові суднові застосування**
Мідь	Висока провідність, добра технологічність	Маса, вартість, поверхневе окиснення	Кабельні жили, обмотки, шини, контакти
Луджена мідь	Кращий захист поверхні у вологому середовищі	Додаткова технологічна операція	Суднові кабелі, багатодротяні жили, клемні зони
Алюміній	Мала густина, нижча маса	Менша провідність на одиницю площі, складніші контакти	Спеціальні шинні або кабельні рішення за проєктом
Резистивні сплави	Стабільний підвищений опір, теплостійкість	Не придатні для силового передавання енергії	Нагрівальні та вимірювальні елементи
Біметалевий перехід	Сумісне з’єднання різнорідних провідників	Потребує правильного монтажу	Переходи Cu–Al

Завдання для самостійної роботи до теми 2

1. Поясніть, чому слабко затягнута клема може нагріватися сильніше за сусідню ділянку кабелю такого самого перерізу.
2. Проаналізуйте переваги й ризики застосування алюмінію замість міді у судновій силовій мережі.
3. Наведіть послідовність перевірок при виявленні локального перегріву болтового з’єднання на шині.
4. Поясніть роль герметизації кабельного вводу у збереженні властивостей мідної жили.

Висновки до теми 2

- Питомий опір металів визначається їх будовою, домішками, дефектами та температурою.
- Мідь є базовим матеріалом кабельних жил і обмоток завдяки високій провідності та технологічності.
- Алюміній дає виграш у масі, але потребує іншого підходу до перерізу та контактних з’єднань.
- Контактний опір може зростати через ослаблення затиску, окиснення, забруднення і вібрацію.
- Морське середовище підвищує значення корозійної стійкості, герметизації та якісного монтажу.

Контрольні питання до теми 2

1. Поясніть фізичну природу електропровідності металів.
2. Від яких факторів залежить питомий опір металевого провідника?
3. Запишіть температурну залежність опору в лінійному наближенні.
4. Порівняйте мідь і алюміній як провідникові матеріали.
5. Чому оксидна плівка на алюмінії є проблемою для контактних з’єднань?

6. Що називають контактним опором і від чого він залежить?

7. Для чого застосовують сплави високого питомого опору?

8. Чому вібрація може призвести до перегріву клемного з’єднання?

9. Які корозійні фактори характерні для суднових умов?

10. Які параметри, крім електропровідності, слід враховувати при виборі провідника суднового кабелю?

ТЕМА 3. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Напівпровідникові матеріали займають проміжне положення між провідниками і діелектриками за електропровідністю, але їх головна особливість полягає не у числовому значенні питомого опору, а в можливості керувати концентрацією носіїв заряду температурою, легуванням, світлом, електричним полем та іншими впливами. Саме це робить напівпровідники основою сучасної силової електроніки, автоматики та вимірювальної техніки.

3.1. Енергетичні зони у твердих тілах

У кристалі окремі енергетичні рівні атомів утворюють енергетичні зони. Для електропровідності особливо важливі валентна зона і зона провідності, розділені забороненою зоною. У металах дозволені стани для носіїв доступні без значного енергетичного бар'єра. У напівпровідниках ширина забороненої зони така, що при підведенні енергії частина електронів переходить у зону провідності. У діелектриках такий перехід за звичайних умов значно менш імовірний.



Рисунок 5 — Схематичне положення рівня Фермі у власному та домішкових напівпровідниках

3.2. Власна електропровідність

У чистому напівпровіднику теплове збудження може створити пару носіїв: електрон у зоні провідності та дірку у валентній зоні. Обидва типи носіїв беруть

участь у перенесенні заряду. З підвищенням температури концентрація таких пар зростає, тому електропровідність напівпровідника зазвичай збільшується, а питомий опір зменшується — на відміну від типових металів.

Температурна чутливість корисна для датчиків, але є викликом для силової електроніки. Напівпровідникові прилади мають працювати в межах допустимої температури кристала, тому тепловідведення, теплопровідні інтерфейси, радіатори і контроль температури є частиною матеріалознавчої задачі.

3.3. Домішкова електропровідність. n- і p-тип

Легування — введення контрольованої кількості домішок у напівпровідник. Донорні домішки збільшують концентрацію електронів і формують матеріал n-типу; акцепторні збільшують концентрацію дірок і формують p-тип. Зміна концентрації та профілю легування дозволяє створювати p-n переходи, транзисторні структури та інші функціональні елементи.

Параметри напівпровідникового матеріалу надзвичайно чутливі до чистоти та дефектів. Тому виробництво мікроелектронних і силових структур потребує значно жорсткішого контролю складу та кристалічної досконалості, ніж більшість традиційних конструкційних матеріалів.

3.4. Кремній, германій та широкозонні матеріали

Кремній є основним матеріалом сучасної електроніки завдяки розвиненій технологічній базі, стабільному оксиду та доброму компромісу властивостей. Германій історично відіграв значну роль і зберігає спеціалізовані застосування. Для високих напруг, високих температур і високочастотного перетворення все ширше застосовують широкозонні матеріали, зокрема карбід кремнію (SiC) і нітрид галію (GaN).

Матеріал	Типова сильна сторона	Застосування у контексті електротехніки
Si	зріла технологія, широкий спектр приладів	діоди, тиристори, IGBT, MOSFET, датчики, мікроелектроніка
Ge	висока рухливість носіїв у спеціальних структурах	спеціалізована електроніка, сенсори
SiC	висока електрична міцність і робоча температура	силові модулі високої напруги, ефективні перетворювачі
GaN	висока швидкість перемикання, високочастотні можливості	компактні високочастотні перетворювачі

Уточнення. Вибір SiC або GaN не означає автоматичної переваги в будь-якому перетворювачі. Ефект залежить від напруги, потужності, частоти перемикання, схеми, охолодження, вартості, електромагнітної сумісності та кваліфікації конкретного виробу для морського застосування.

3.5. Термоелектричні явища

Термоелектричні явища пов’язують температурні та електричні процеси. Ефект Зеєбека полягає у виникненні термо-ЕРС у колі з різнорідних матеріалів при різниці температур спаїв. На цьому принципі працюють термопари. Ефект Пельтьє полягає у виділенні або поглинанні тепла на контакті різнорідних матеріалів при проходженні струму. Ефект Томсона описує теплообмін у провіднику з температурним градієнтом при протіканні струму.

$$U_T \approx S \cdot \Delta T,$$

де S — коефіцієнт Зеєбека для пари матеріалів, ΔT — різниця температур. Для точних вимірювань використовують калібрувальні характеристики конкретного типу термопари.

На суднах термопари та інші температурні датчики застосовують для контролю підшипників, вихлопних газів, електродвигунів, генераторів,

трансформаторів, силових модулів та технологічного обладнання. Матеріал датчика повинен бути сумісним з температурним діапазоном і середовищем, а вимірювальний ланцюг — захищеним від електромагнітних завад.

3.6. Напівпровідникові прилади та матеріалознавчі вимоги

Силові діоди, тиристори, MOSFET та IGBT працюють як керовані елементи перетворення електричної енергії. Їх характеристики визначаються не лише схемою, а й матеріалом кристала, топологією структури, корпусом, металізацією, ізоляцією та тепловим інтерфейсом. Відмова часто пов’язана не з самим напівпровідником, а з термоциклічною втомою паяних шарів, відривом з’єднувальних провідників, деградацією компаунду або перегрівом.

В імпульсному режимі середня потужність може бути помірною, але миттєві теплові й електричні навантаження — високими. Тому важливі тепловий опір, теплоємність, коефіцієнти теплового розширення та сумісність матеріалів корпуса. Повторні цикли нагрівання й охолодження створюють механічні напруження на межах різнорідних матеріалів.

3.7. Силова електроніка у суднових системах

Сучасні судна широко використовують частотні перетворювачі для регулювання швидкості насосів, вентиляторів, компресорів, лебідок та інших електроприводів. На електрифікованих і гібридних суднах силова електроніка є ключовою частиною систем накопичення енергії, перетворення напруги та електроруху.

Морське середовище висуває підвищені вимоги до захисту електроніки від вологи, конденсації, соляного туману та вібрації. На рівні конструкції застосовують герметизовані корпуси, конформні покриття друкованих плат, компаундування, антикорозійні матеріали, фільтрацію та контроль мікроклімату.

При цьому надмірна герметизація може ускладнювати відведення тепла, тому захист від середовища і тепловий режим необхідно узгоджувати.

3.8. Датчики на основі напівпровідникових матеріалів

Напівпровідникові матеріали застосовують у терморезисторах, датчиках тиску, Холлівських датчиках, фотодіодах, газочутливих елементах та інших сенсорах. Для морських систем важливі не лише чутливість і точність, а й стабільність при вологості, температурних циклах, вібрації та електромагнітних завадах.

Терморезистори з негативним температурним коефіцієнтом використовують для вимірювання температури й компенсації, а позистори — у захисних і саморегулювальних колах. Датчики Холла дозволяють безконтактно вимірювати струм або визначати положення. Проте чутливий елемент завжди є лише частиною вимірювальної системи: похибку визначають також корпус, кабель, електроніка та монтаж.

3.9. Надійність і типові механізми відмов

Для напівпровідникових систем критичними є перегрів, перенапруга, перевищення струму, електростатичні розряди, електрохімічна міграція на забруднених платах, корозія виводів, термоциклічна втома та деградація ізоляції. Чим вища щільність потужності, тим більшою стає роль теплового проєктування.

Профілактика включає контроль температури та вентиляції, очищення теплообмінників і фільтрів, перевірку вентиляторів, термографію силових з’єднань, аналіз журналів аварій, контроль стану конденсаторів і огляд плат на ознаки корозії або перегріву. Для обладнання, критичного для безпеки, обсяг і періодичність процедур визначаються виробником і судновою системою технічного обслуговування.

3.10. Приклад: частотний перетворювач суднового насоса

У частотному перетворювачі одночасно працюють напівпровідникові модулі, мідні шини, конденсатори, магнітні дроселі, ізоляційні матеріали, друковані плати, теплопровідні пасти або прокладки та система охолодження. Відмова вентилятора може спочатку проявитися лише підвищенням температури силового модуля. Згодом термоциклічні напруження прискорюють деградацію з'єднань, а локальний перегрів змінює характеристики ізоляції. Тому діагностика такого вузла повинна враховувати взаємодію матеріалів і тепловий баланс.

3.11. p–n-перехід як основа напівпровідникових приладів

Якщо в одному кристалі створити області p- та n-типу, на їх межі формується p–n-перехід. Через дифузію носіїв поблизу межі виникає збіднений шар із внутрішнім електричним полем. Зовнішня напруга змінює ширину цього шару й умови проходження носіїв, завдяки чому перехід має виражену нелінійну вольт-амперну характеристику. На цьому принципі базуються діоди, а складніші структури утворюють транзистори та тиристорні прилади.

Матеріалознавчий аспект полягає в тому, що характеристики приладу визначаються чистотою кристалу, концентрацією і профілем легування, дефектами, якістю меж, пасивацією поверхні та тепловим контактом із корпусом. Тому слово «кремній» не описує весь матеріальний об'єкт: силовий модуль є багатошаровою системою з напівпровідникового кристалу, металізації, припою або іншого з'єднувального шару, підкладки, ізолятора, тепловідвідної основи та герметизуючих матеріалів.

3.12. Кремній, карбід кремнію та нітрид галію

Кремній залишається базовим матеріалом силової електроніки завдяки розвиненій технології, передбачуваним властивостям та широкій номенклатурі приладів. Широкозонні матеріали, зокрема карбід кремнію (SiC) і нітрид галію

(GaN), мають вищу критичну напруженість електричного поля та можуть працювати при вищих частотах перемикання, ніж традиційні кремнієві рішення. Це створює можливості для зменшення втрат і габаритів пасивних компонентів.

Проте перевага матеріалу не означає автоматичної переваги конкретної системи. Висока швидкість перемикання підвищує вимоги до компоновки, ізоляції, електромагнітної сумісності та теплового дизайну. У суднових приводах важливі також сервісна доступність, наявність запасних модулів і підтверджена надійність у морських умовах. Тому застосування широкозонних напівпровідників слід розглядати як інженерний вибір на рівні всієї системи.

3.13. Корпусування та тепловий шлях силового модуля

У силовій електроніці температура p–n-переходу є критичною характеристикою, але відводиться тепло через низку матеріальних шарів. Тепловий потік проходить від кристалу через з’єднувальний шар, керамічну або композиційну підкладку, металеву основу, теплопровідний інтерфейс і радіатор. Тепловий опір кожної межі додається до загального, тому навіть добрий напівпровідниковий матеріал може перегріватися при поганому тепловому контакті.

Циклічне нагрівання і охолодження створює термомеханічну втому. Різні коефіцієнти теплового розширення кристалу, металізації, припою, міді та кераміки викликають повторювані напруження. Типовими механізмами деградації є втома з’єднувальних шарів, відшарування, тріщини і пошкодження дротяних або стрічкових з’єднань. Для частотного перетворювача суднового механізму це означає, що ресурс залежить не тільки від середнього навантаження, а й від кількості та амплітуди теплових циклів.

3.14. Волога, конденсація та електронні плати

Електронна апаратура може відмовляти не через руйнування напівпровідникового кристалу, а через матеріали плати й контактів. Конденсат у поєднанні з іонними забрудненнями знижує поверхневий опір, сприяє електрохімічній міграції металу та корозії виводів. При наявності різниці потенціалів на вологій поверхні можуть формуватися провідні дендрити, що створюють витік або коротке замикання.

Захисні покриття друкованих плат, герметизація корпусів, вентиляція та контроль мікроклімату зменшують ризик, але не компенсують погану підготовку поверхні. Покриття, нанесене на забруднену або вологу плату, може законсервувати дефект. У морській експлуатації важлива дисципліна ремонту: очищення, сушіння, контроль якості пайки й відновлення захисного шару після заміни компонента.

3.15. Термоелектричні датчики й контроль стану механізмів

Ефект Зеєбека використовується в термопарах: різниця температур між двома спаями різнорідних провідників створює термоелектричну напругу. Хоча термопара не є напівпровідниковим приладом у вузькому сенсі, термоелектричні явища є важливим елементом теми, а в сучасних системах вимірювальний сигнал часто обробляється напівпровідниковою електронікою. Для точності важливі матеріал електродів, однорідність провідників, якість контактів і компенсація температури холодного спаю.

Напівпровідникові датчики температури, тиску, струму та положення широко застосовують у системах автоматизації. При виборі датчика для суднової установки оцінюють не лише діапазон вимірювання, а й матеріал корпусу, герметичність, стійкість кабельного вводу, електромагнітну сумісність та допустиму температуру електроніки.

Матеріал	Ключова особливість	Сильні сторони	Застереження для суднової системи
Si	Зріла технологія силових приладів	Широка доступність, відпрацьовані модулі	Втрати й температурні обмеження залежать від топології та охолодження
SiC	Широка заборонена зона, висока критична напруженість поля	Високовольтні та швидкодіючі силові ключі	Високі dv/dt, вимоги до ізоляції та компоновки
GaN	Висока швидкість перемикання	Високочастотні компактні перетворювачі	Системне застосування залежить від класу напруги й вимог надійності
Напівпровідникові сенсори	Чутливість електричних параметрів до фізичної величини	Компактність, інтеграція з автоматикою	Потреба у захисті від вологи, перегріву та перешкод

Завдання для самостійної роботи до теми 3

1. Поясніть, чому тепловий опір корпусу силового модуля так само важливий, як властивості напівпровідникового кристалу.
2. Порівняйте системні переваги і додаткові вимоги при переході від кремнієвих ключів до SiC у частотному перетворювачі.
3. Опишіть механізм, за яким конденсат на друкованій платі може спричинити електричну відмову.
4. Наведіть приклади суднових механізмів, для яких контроль температури є критичним, і запропонуйте тип датчика.

Висновки до теми 3

- Електропровідність напівпровідників керується концентрацією носіїв і сильно залежить від температури та домішок.

- Легування створює матеріали n- і p-типу та дозволяє формувати функціональні електронні структури.
- Кремній залишається базовим матеріалом, а SiC і GaN розширюють можливості високоефективної силової електроніки.
- У морських системах надійність електроніки значною мірою визначається тепловим режимом, вологозахистом, вібраційною стійкістю та якістю міжз'єднань.
- Термоелектричні явища широко використовуються у вимірюванні температури суднових механізмів.

Контрольні питання до теми 3

1. Чим відрізняються енергетичні зони провідника, напівпровідника та діелектрика?
2. Що називають власною електропровідністю напівпровідника?
3. Як температура впливає на концентрацію носіїв у власному напівпровіднику?
4. Що таке донорні та акцепторні домішки?
5. Чим відрізняються напівпровідники n- і p-типу?
6. Назвіть основні переваги кремнію як матеріалу електроніки.
7. Які особливості SiC і GaN роблять їх цікавими для силової електроніки?
8. Поясніть ефект Зеєбека.
9. Які фактори морського середовища впливають на надійність електронних модулів?
10. Чому тепловий інтерфейс є частиною матеріалознавчої задачі силового модуля?

ТЕМА 4. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Магнітні матеріали є основою магнітопроводів генераторів, електродвигунів, трансформаторів, дроселів, електромагнітів і датчиків. Їх властивості визначають величину магнітного потоку, втрати, нагрівання, габарити і масу електротехнічного пристрою. Для суднової техніки це безпосередньо пов’язано з енергоефективністю, компактністю та надійністю систем.

4.1. Основні магнітні величини

Магнітний стан матеріалу описують напруженістю магнітного поля H, магнітною індукцією B та намагніченістю M. У простому лінійному наближенні для ізотропного матеріалу використовують співвідношення:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H,$$

де μ_0 — магнітна стала, μr — відносна магнітна проникність. Для феромагнітних матеріалів μr не є сталою: вона залежить від H, попередньої магнітної історії, температури, механічних напружень і структури матеріалу.

Магнітний потік Ф характеризує сумарне магнітне поле через певну поверхню. Для однорідного поля, перпендикулярного до поверхні, $Ф = B \cdot S$. У магнітопроводах електричних машин і трансформаторів прагнуть організувати потік так, щоб він проходив переважно через матеріал з високою магнітною проникністю.

4.2. Діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики

Діамагнетики створюють слабку намагніченість, напрямлену проти зовнішнього поля. Парамагнетики — слабку намагніченість у напрямку поля. Феромагнетики мають значно сильнішу реакцію через доменну будову та взаємодію магнітних моментів. Саме феромагнітні та споріднені матеріали використовують у магнітопроводах електротехнічного обладнання.

Феромагнітний матеріал складається з доменів — областей спонтанної намагніченості. Під дією поля змінюються межі доменів і напрям магнітних моментів. Частина цих процесів є незворотною, тому при циклічному перемагнічуванні виникає гістерезис.

4.3. Магнітний гістерезис

Петля гістерезису відображає залежність B(H) при повному циклі перемагнічування. Залишкова індукція характеризує магнітний стан після зняття зовнішнього поля, а коерцитивна сила — поле, необхідне для розмагнічування матеріалу. Площа петлі пов’язана з енергією, що втрачається на гістерезис за цикл перемагнічування.

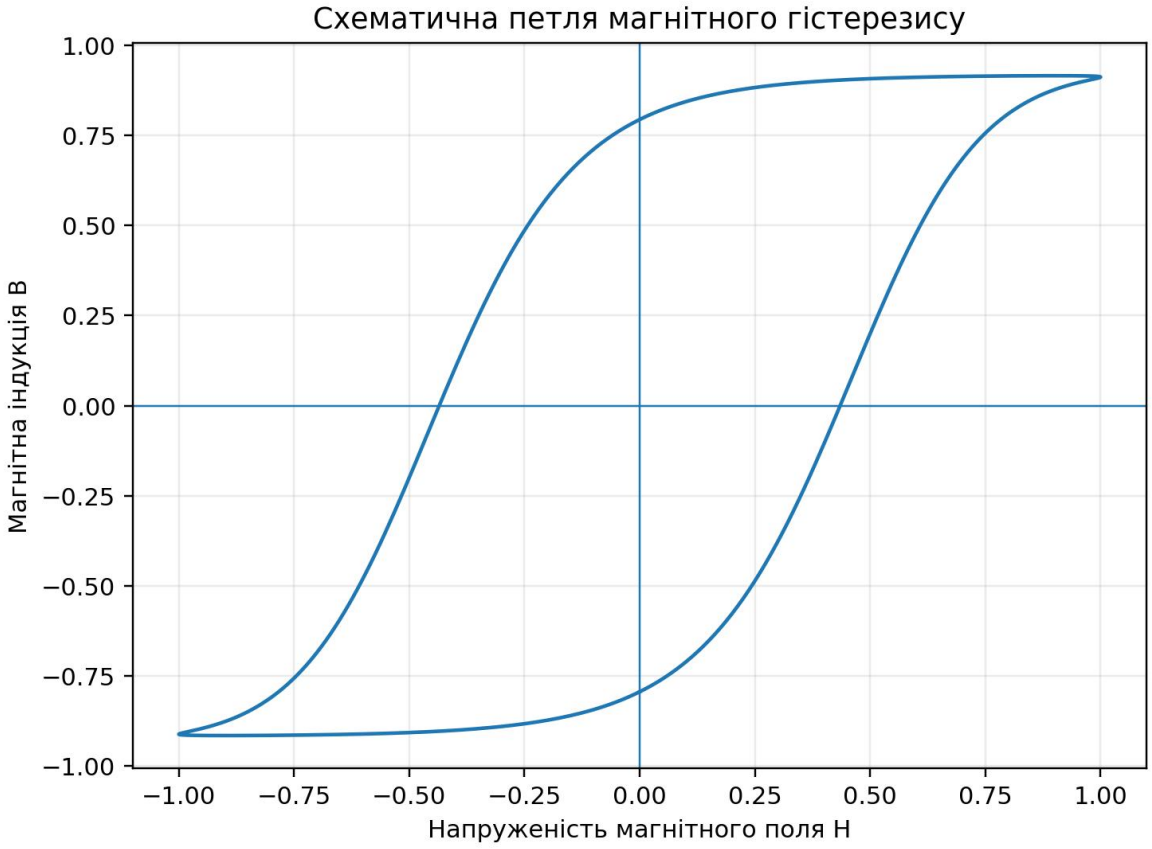


Рисунок 6 — Схематична петля магнітного гістерезису

4.4. Магнітом’які матеріали

Магнітом’які матеріали призначені для роботи у змінному або керованому магнітному полі. Вони повинні мати високу магнітну проникність, малу коерцитивну силу та низькі питомі втрати. До них належать електротехнічні сталі, деякі нікель-залізні сплави, ферити, аморфні та нанокристалічні сплави.

В електричних машинах широко застосовують тонколистові електротехнічні сталі. Поділ магнітопроводу на ізольовані листи зменшує контури вихрових струмів і тим самим знижує втрати. Товщина листа, склад сталі, текстура та якість ізоляційного покриття впливають на втрати й технологічність складання.

4.5. Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали використовують для постійних магнітів. Для них бажані висока коерцитивна сила, достатня залишкова індукція та стабільність проти розмагнічування. До сучасних матеріалів належать феритові, неодим-залізо-борові та самарій-кобальтові магніти. Кожна система має власний баланс магнітних властивостей, температурної стабільності, корозійної стійкості та вартості.

У морському електроприводі постійні магніти можуть застосовуватися в синхронних машинах. Для таких систем особливо важливі захист від корозії, контроль температури ротора і недопущення режимів, що можуть спричинити часткове розмагнічування.

4.6. Втрати в магнітних матеріалах

Основні втрати в магнітопроводі пов’язані з гістерезисом та вихровими струмами; у реальних матеріалах виділяють також додаткові складові. Вихрові струми індукуються змінним магнітним потоком у провідному матеріалі і створюють джоулеве тепло. Для їх зменшення підвищують електричний опір матеріалу і зменшують товщину електрично ізольованих листів.

Зі зростанням частоти втрати зростають, тому матеріал магнітопроводу обирають з урахуванням робочої частоти. Для машин і трансформаторів мережевої частоти застосовують електротехнічні сталі; для значно вищих частот у дроселях та трансформаторах силової електроніки часто використовують ферити, порошкові, аморфні або нанокристалічні матеріали.

4.7. Електротехнічні сталі

Електротехнічні сталі — спеціальні сталі з контрольованим складом, структурою і текстурою, оптимізовані для зниження магнітних втрат. Для обертових машин важливі сталі з властивостями, придатними для змінного напрямку магнітного потоку в площині листа; для трансформаторів можуть використовуватися текстуровані сталі з особливо сприятливими властивостями вздовж напрямку прокатки.

Механічне пошкодження, задирки, коротке замикання між листами та надмірні напруження після обробки можуть погіршувати магнітні характеристики. Технологія штампування, складання й ремонту магнітопроводу є не менш важливою, ніж марка сталі.

4.8. Ферити, аморфні та нанокристалічні матеріали

Ферити мають високу питомо-електричну опірність, тому вихрові струми в них малі. Це робить їх ефективними на підвищених частотах. Водночас допустима магнітна індукція та механічні властивості відрізняються від електротехнічних сталей. Аморфні та нанокристалічні сплави можуть забезпечувати дуже низькі втрати, але їх використання визначається конструкцією, частотою, рівнем потоку, технологічністю й економікою.

Група матеріалів	Основна перевага	Типове застосування
Електротехнічні сталі	висока індукція і прийнятні втрати на низьких частотах	генератори, двигуни, силові трансформатори
Ферити	високий електричний опір і низькі вихрові втрати	високочастотні трансформатори, дроселі, фільтри
Аморфні сплави	дуже низькі питомі втрати в певних режимах	спеціальні енергоефективні магнітопроводи
Нанокристалічні сплави	висока проникність і низькі високочастотні втрати	дроселі, фільтри, спеціальні трансформатори

4.9. Магнітні матеріали суднових генераторів і двигунів

У суднових генераторах і електродвигунах магнітопроводи статора та ротора повинні забезпечувати необхідний магнітний потік з мінімальними втратами. Нагрів магнітопроводу додається до втрат у міді, механічних і вентиляційних втрат, тому впливає на загальний тепловий режим машини.

Вібрація та циклічні механічні навантаження можуть впливати на кріплення пакетів сталі. Корозія поверхонь і пошкодження ізоляції між листами можуть локально збільшувати вихрові струми. Під час ремонту неприпустимо неконтрольовано змінювати конструкцію пакета або створювати металеві перемички між листами.

4.10. Магнітні матеріали трансформаторів і дроселів

У трансформаторі магнітний матеріал визначає струм намагнічування, втрати холостого ходу, нагрів і габарити. Для силових трансформаторів мережевої частоти традиційно використовують електротехнічні сталі; у високочастотних імпульсних перетворювачах — матеріали з високим питомим опором і низькими втратами на відповідній частоті.

Дроселі частотних перетворювачів працюють у несинусоїдальних режимах, тому їх магнітопроводи повинні бути розраховані на спектр частот, можливе постійне підмагнічування та локальний нагрів. Неправильний матеріал може призвести до насичення, різкого зростання струму або перегріву.

4.11. Вплив температури та механічних напружень

Магнітні властивості залежать від температури. При наближенні до температури Кюрі феромагнітний порядок руйнується. Значно нижче цієї температури також можуть змінюватися проникність, коерцитивна сила і втрати. Для постійних магнітів підвищена температура може зменшувати магнітні характеристики, а в несприятливих умовах — викликати необоротне розмагнічування.

Механічні напруження можуть змінювати доменну структуру і магнітні властивості. Тому штампування, пресування, зварювання і складання електротехнічної сталі повинні виконуватися за технологією, що мінімізує пошкодження активної зони магнітопроводу.

4.12. Магнітні матеріали у системах автоматики

Магнітні матеріали застосовують у реле, контакторах, трансформаторах струму, індуктивних датчиках, електромагнітних клапанах і фільтрах. Тут критичними можуть бути не тільки втрати, а й швидкість перемагнічування, залишкова намагніченість, стабільність за температури та геометрична точність магнітного кола.

У морських системах автоматики електромагнітні пристрої часто працюють у режимі багатьох циклів увімкнення. Знос механічної частини, корозія якоря або зміна повітряного зазору можуть змінювати магнітний режим, струм котушки та нагрів. Тому причину відмови іноді слід шукати не в обмотці, а в механіці магнітної системи.

4.13. Доменна структура феромагнетиків

У феромагнітному матеріалі магнітні моменти атомів взаємодіють так, що утворюються області узгодженої орієнтації — домени. Без зовнішнього поля напрями намагніченості різних доменів можуть компенсувати один одного, і зразок має малу результуючу намагніченість. Під дією поля межі доменів переміщуються, а магнітні моменти переорієнтовуються. Дефекти кристалічної решітки, домішки, внутрішні напруження і межі зерен перешкоджають цьому руху й тому впливають на коерцитивну силу та гістерезисні втрати.

Саме зв’язок мікроструктури з магнітними властивостями пояснює, чому технологія прокатки, відпалу й легування електротехнічної сталі має велике значення. Магнітопровід — це не просто шматок сталі заданої форми: його втрати залежать від складу, текстури, товщини листа, стану поверхневого ізоляційного покриття та механічних напружень після штампування і складання.

4.14. Вихрові струми та шихтування магнітопроводів

Змінний магнітний потік індукує електрорушійну силу не лише в обмотці, а й у самому електропровідному осерді. У масивному металевому сердечнику виникають замкнені вихрові струми, які створюють додаткові втрати I^2R і нагрів. Для їх зменшення магнітопровід набирають із тонких електроізольованих листів. Ізоляція між листами розриває великі контури струму та збільшує їх електричний опір.

Якісно втрати від вихрових струмів зростають із квадратом частоти, квадратом індукції та квадратом товщини листа, а зі збільшенням питомого опору матеріалу зменшуються. Тому підвищення частоти стимулює застосування тонших листів, феритів, порошкових, аморфних або нанокристалічних матеріалів. Водночас конкретний вибір визначається рівнем індукції, частотою, механічними вимогами й вартістю.

4.15. Аморфні й нанокристалічні магнітні матеріали

Аморфні металеві сплави не мають далекого кристалічного порядку, а нанокристалічні містять дуже дрібні кристалічні області в аморфній матриці. Така структура може забезпечувати малу коерцитивну силу й низькі втрати на підвищених частотах. Матеріали застосовують у спеціальних трансформаторах, дроселях, фільтрах і високочастотних магнітних компонентах, де традиційна електротехнічна сталь стає менш ефективною.

Їх переваги мають технологічну ціну: тонкі стрічки складніші у механічній обробці, чутливі до деформацій і потребують спеціальної конструкції сердечника. Для суднової техніки такі матеріали цікаві насамперед у компактних перетворювальних системах, але вибір повинен базуватися на підтверджених характеристиках конкретного компонента.

4.16. Постійні магніти в суднових електричних машинах

Магнітотверді матеріали використовують для створення постійного магнітного потоку. Сучасні рідкісноземельні магніти забезпечують високу енергетичну щільність, що дозволяє зменшувати масу й габарити електричних машин. Для суднових приводів це може бути важливо у системах з жорсткими обмеженнями простору та маси. Проте постійний магніт також є матеріалом, чутливим до температури, корозії та розмагнічувального поля.

Магніти на основі Nd–Fe–B мають високі магнітні характеристики, але потребують уваги до корозійного захисту та температурного режиму. Самарій-кобальтові магніти мають інший баланс властивостей, зокрема високу температурну стабільність, але відрізняються вартістю й технологічними особливостями. Інженерний вибір роблять за характеристиками конкретного типу магніту та режимом роботи машини.

4.17. Магнітострикція, шум і вібрація

Під час намагнічування феромагнітний матеріал дещо змінює геометричні розміри. Це явище називають магнітострикцією. У трансформаторі періодичні деформації листів магнітопроводу можуть бути одним із джерел характерного шуму. Механічне кріплення пакета, стан стиків, рівень індукції та гармонічний склад напруги впливають на акустичну поведінку.

На судні вібрація магнітопроводу накладається на загальний вібраційний фон. Ослаблення кріплень може збільшити шум, сприяти тертю листів і пошкодженню ізоляційного покриття між ними. Тому зміна акустичного або вібраційного стану трансформатора чи електричної машини може бути непрямою ознакою механічних або електромагнітних змін.

4.18. Діагностика стану магнітопроводів

Погіршення магнітних властивостей часто проявляється через підвищені втрати та нагрів. Причиною можуть бути короткозамкнені листи пакета, локальні пошкодження ізоляційного покриття, механічна деформація, перенасичення або зміна режиму живлення. У трансформаторах і машинах використовують температурний контроль, аналіз струмів, вібрації та інші методи діагностики, пов’язані з конкретною конструкцією.

Під час ремонту важливо не погіршити властивості магнітопроводу. Неконтрольоване шліфування, зварювання, перегрів або надмірне механічне стискання можуть створити локальні напруження й провідні перемички між листами. Матеріалознавчий підхід вимагає враховувати, що технологія ремонту змінює структуру і, відповідно, експлуатаційні властивості матеріалу.

Група матеріалів	Характеристика	Основне застосування	Матеріалознавчий ризик
Електротехнічні сталі	Висока індукція, листова структура	Машини, трансформатори мережевої частоти	Вихрові струми, напруження, пошкодження міжлистової ізоляції
Ферити	Високий питомий опір, робота на вищих частотах	Дроселі, фільтри, імпульсні трансформатори	Крихкість, обмеження за індукцією
Аморфні/нанокристалічні сплави	Низькі втрати на підвищених частотах	Спеціальні сердечники, фільтри	Чутливість до механічного впливу, технологічність
Постійні магніти	Висока залишкова індукція і коерцитивна сила	Синхронні машини, датчики	Температурна стабільність, корозія, розмагнічування

Завдання для самостійної роботи до теми 4

1. Поясніть, чому магнітопровід трансформатора виготовляють із тонких ізольованих листів, а не з суцільної сталевої деталі.
2. Проаналізуйте, як механічне пошкодження міжлистової ізоляції може вплинути на температуру трансформатора.
3. Порівняйте електротехнічну сталь і ферит для роботи на низькій та високій частоті.
4. Назвіть матеріалознавчі фактори, які необхідно контролювати у машині з постійними магнітами.

Висновки до теми 4

- Магнітні властивості матеріалів нелінійні та залежать від магнітної історії, температури і механічного стану.
- Магнітом’які матеріали застосовують у змінних полях, магнітотверді — для постійних магнітів.

- Втрати в магнітопроводі включають гістерезисні та вихрові складові й зростають зі зміною частотного режиму.
- Електротехнічна сталь є базовим матеріалом більшості суднових генераторів, двигунів і трансформаторів мережевої частоти.
- Для силової електроніки важливі ферити, аморфні, нанокристалічні та інші високочастотні магнітні матеріали.

Контрольні питання до теми 4

1. Назвіть основні магнітні величини та поясніть їх фізичний зміст.
2. Чим відрізняються діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики?
3. Що таке магнітний домен?
4. Поясніть фізичний зміст петлі гістерезису.
5. Які матеріали називають магнітом’якими?
6. Які матеріали називають магнітотвердими?
7. Назвіть основні причини втрат у магнітопроводі.
8. Навіщо магнітопроводи електричних машин складають з тонких ізольованих листів?
9. Чому ферити доцільні на підвищених частотах?
10. Які зовнішні фактори суднової експлуатації можуть впливати на магнітні матеріали?

ТЕМА 5. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

У попередніх темах матеріали розглядалися за функціональними класами. У реальному виробі ці класи працюють разом: провідник передає струм, діелектрик формує ізоляцію, магнітний матеріал створює магнітний потік, напівпровідниковий матеріал керує перетворенням енергії, а конструкційні матеріали забезпечують міцність, герметичність і тепловідвід. Тому інженерний вибір виконується на рівні системи, а не окремої властивості.

5.1. Системний підхід до вибору матеріалу

Алгоритм вибору доцільно починати не з назви матеріалу, а з функції деталі та умов роботи. Спочатку визначають електричні, теплові, механічні й середовищні навантаження. Далі встановлюють критичні властивості і допустимі межі. Після цього формують перелік кандидатів, перевіряють технологічність і сумісність, оцінюють вартість життєвого циклу та вимоги до обслуговування.

1. Визначити функцію елемента та можливі режими відмови.
2. Встановити робочі й аварійні електричні навантаження.
3. Встановити температурний діапазон та умови охолодження.
4. Оцінити вологість, конденсацію, сольове забруднення, масла, паливо та інші середовища.
5. Оцінити вібрацію, удари, циклічні навантаження і вимоги до гнучкості.
6. Перевірити пожежні, димові та токсикологічні вимоги для конкретної зони.
7. Перевірити сумісність матеріалів у контакті та технологію монтажу.
8. Перевірити вимоги стандартів, класифікаційного товариства і виробника.
9. Порівняти варіанти за надійністю, ремонтопридатністю та вартістю життєвого циклу.

Такий підхід запобігає типовій помилці: вибору матеріалу лише за однією «кращою» характеристикою. Наприклад, високий клас теплостійкості полімеру не

гарантує його придатності до контакту з мастилом; висока електропровідність металу не гарантує стабільного контакту в корозійному середовищі; низькі магнітні втрати не компенсують недостатню механічну міцність або технологічність.

5.2. Специфічні умови морської експлуатації

Судно є складним автономним технічним об’єктом. Електрообладнання повинно зберігати працездатність при русі, крені, диференті, вібрації, зміні температури, підвищеній вологості та обмеженому доступі для ремонту. Додатковий фактор — неоднорідність умов: машинне відділення, відкрита палуба, житлові приміщення, акумуляторна, вантажні зони та електрощитові мають різні профілі навантаження та середовища.

Фактор	Вплив на матеріали	Типовий наслідок
Волога і конденсація	зменшення поверхневого опору; корозія	струми витоку, трекінг, нестабільні контакти
Сольовий аерозоль	електролітна плівка, прискорення корозії	зростання контактного опору, поверхневі розряди
Висока температура	зростання опору металів, старіння полімерів	перегрів, крихкість, скорочення ресурсу
Вібрація	втома, стирання, послаблення кріплень	обриви, нагрів контактів, пошкодження ізоляції
Масла і паливо	набухання або розчинення несумісних полімерів	втрата механічної міцності оболонок та ущільнень
Пожежа	термічне руйнування, дим і корозійні гази	втрата живлення та небезпека для людей

Умови експлуатації слід розглядати не як окремі фактори, а як їх комбінацію. Наприклад, вібрація може створити мікротріщину в оболонці, через яку проникає волога; волога прискорює корозію, а корозія збільшує опір контакту і нагрівання. Таким чином, первинна механічна проблема переходить в електричну та теплову.

5.3. Суднові кабелі як багатоматеріальна система

Кабель складається не лише з провідника. Типова конструкція може включати багатодротяну мідну жилу, ізоляцію, заповнювач, екран, внутрішню оболонку, броню або механічний захист та зовнішню оболонку. Кожний шар виконує власну функцію і повинен бути сумісним з іншими.

Для провідника критичні електропровідність і гнучкість; для ізоляції — електрична міцність, теплостійкість і довговічність; для оболонки — механічна, хімічна та вологісна стійкість. У кабелях, що повинні зберігати функцію під час пожежі, конструкція може включати спеціальні вогнестійкі бар'єри. Конкретні матеріали і виконання визначаються призначенням кабелю та стандартами.

Помилка вибору одного шару може знизити надійність усієї системи. Наприклад, хімічно нестійка оболонка може розтріскатися, після чого волога проникне до ізоляції й екрана. Неправильний радіус вигину під час монтажу може створити механічні пошкодження ще до введення кабелю в експлуатацію.

Шар кабелю	Основна функція	Критичні властивості
Струмопровідна жила	передавання струму	провідність, гнучкість, стабільність контакту
Ізоляція	електричне розділення	електрична міцність, теплостійкість, низькі втрати
Екран	керування полем/ЕМС	провідність, безперервність, надійне заземлення
Оболонка	захист від середовища	волого-, масло-, хімічна і механічна стійкість
Броня/захист	механічний захист	міцність, корозійна стійкість, технологічність монтажу

5.4. Матеріали суднових генераторів

Судновий генератор поєднує мідні обмотки, електротехнічну сталь магнітопроводу, електроізоляційні матеріали, конструкційні сталі, підшипникові матеріали, лаки, смоли та контактні системи. Втрати в міді й сталі перетворюються на тепло, яке повинно бути відведене системою вентиляції або охолодження.

Ключовим матеріалознавчим завданням є узгодження температурних класів і коефіцієнтів теплового розширення. Якщо обмотка нагрівається і охолоджується, різні компоненти ізоляційної системи деформуються по-різному. Повторні цикли можуть сприяти утворенню тріщин, послабленню просочення або стиранню в зонах механічного контакту.

Для генератора особливо важливі чистота вентиляційних каналів, відсутність провідного пилу і масляних забруднень, контроль температури підшипників та обмоток, а також трендовий контроль ізоляції. Погіршення теплообміну може підвищити температуру навіть без зміни електричного навантаження.

Приклад експлуатаційного аналізу. Якщо температура однієї фази обмотки стабільно вища за інші, причин може бути декілька: нерівномірне навантаження, погіршення контакту, локальний дефект обмотки, забруднення вентиляційного каналу або похибка датчика. Матеріалознавчий підхід вимагає перевіряти не лише електричну схему, а й стан контактів, ізоляції та охолодження.

5.5. Матеріали суднових електродвигунів

Електродвигуни насосів, вентиляторів, компресорів, кермових машин та палубних механізмів працюють у різних умовах. Для двигуна в сухому вентильованому приміщенні і двигуна на відкритій палубі вимоги до герметизації, покриттів та ізоляції можуть істотно відрізнятися.

В асинхронному двигуні основними функціональними матеріалами є мідь або алюміній провідників, електротехнічна сталь магнітопроводу, ізоляція обмотки, просочувальні матеріали, конструкційні сталі та підшипникові матеріали. У синхронних машинах можуть додаватися постійні магніти або обмотки збудження.

Під час живлення від частотного перетворювача обмотка двигуна може зазнавати більш крутих фронтів напруги, ніж при синусоїдальному живленні. Це підвищує вимоги до ізоляції витків і кабельної системи. Високочастотні складові можуть впливати на втрати в магнітопроводі й створювати паразитні струми через підшипники; конкретні заходи залежать від привода та рекомендацій виробника.

Практичний висновок. Матеріал, який добре працює у звичайному двигуні мережевої частоти, не можна автоматично вважати рівноцінним для привода з PWM-перетворювачем. Потрібно оцінювати ізоляцію, магнітопровід, підшипникову систему, кабель і заземлення як єдину систему.

5.6. Трансформатори

Трансформатор поєднує провідникові, магнітні й діелектричні матеріали. Провідник визначає втрати навантаження; магнітопровід — втрати холостого ходу і магнітні характеристики; ізоляція — допустиму напругу та ресурс; конструкція охолодження — робочу температуру.

Для суднової установки важливими є габарити, маса, вентиляція, рівень шуму і вібрації, пожежна безпека та доступність обслуговування. У сухих трансформаторах стан поверхні та вентиляції критичний для відведення тепла і запобігання забрудненню ізоляції.

Якщо трансформатор працює з несинусоїдальним навантаженням, гармонічні складові можуть збільшити додаткові втрати в обмотках та магнітопроводі. Тому тепловий режим потрібно оцінювати за фактичним характером навантаження, а не лише за активною потужністю.

5.7. Розподільні щити і комутаційна апаратура

Головний розподільний щит концентрує струмопровідні шини, апарати захисту, контактори, вимірювальні трансформатори, ізолятори, кабельні вводи та електронні модулі. Тут особливо важливі контактні матеріали, термостійкі ізоляційні деталі та конструкційні матеріали, що забезпечують механічну міцність і захист.

Основний експлуатаційний ризик контактних з’єднань — локальний перегрів. Його причинами можуть бути недостатній момент затягування, корозія, вібрація, забруднення або перевантаження. Термографічний контроль при навантаженні часто дозволяє виявити проблемні з’єднання до появи видимого пошкодження.

Для ізоляторів і полімерних деталей щита небезпечне поєднання пилу, вологи та підвищеної температури. Забруднення може формувати провідні доріжки на поверхні; нагрів прискорює старіння; дуговий розряд спричиняє карбонізацію, після якої поверхня стає ще провіднішою.

5.8. Силова електроніка та перетворювачі частоти

Частотний перетворювач містить силові напівпровідникові модулі, конденсатори, магнітні компоненти, друковані плати, шини постійного струму, ізолятори, вентилятори або рідинне охолодження. Матеріали працюють при різних температурах і мають різні коефіцієнти теплового розширення. Тому термоциклічна надійність часто визначає ресурс.

Забруднення та конденсація небезпечні через малі відстані між провідними доріжками і високі швидкості зміни напруги. Конформні покриття та герметизація можуть підвищити стійкість, але не усувають потребу в контролі температури й чистоти. Для шаф перетворювачів необхідно підтримувати передбачені виробником умови вентиляції.

Силові конденсатори, резистори попереднього заряду, дроселі та шини є такими самими критичними матеріальними елементами, як і напівпровідниковий модуль. Старіння конденсатора може збільшувати пульсації, а перегрів дроселя — змінювати індуктивність і прискорювати деградацію ізоляції.

5.9. Електрорух і високопотужні суднові системи

У системах електроруху потужність передається через генератори, перетворювачі, шини, кабелі та гребні електродвигуни. Збільшення потужності підвищує вимоги до струмової навантажувальної здатності, ізоляції, охолодження та електродинамічної стійкості. У середньо- і високовольтних системах стан ізоляції та керування електричним полем мають ще більше значення.

Матеріалознавча задача включає не вибір абстрактно «найкращого» матеріалу, а баланс між втратами, масою, габаритами, надійністю, ремонтом і вартістю. Зменшення маси провідника може вимагати більшого перерізу або складнішої контактної системи; підвищення частоти перетворення зменшує габарити магнітних компонентів, але підвищує вимоги до напівпровідників, магнітних матеріалів, ізоляції та електромагнітної сумісності.

Особливе значення має координація ізоляції. У багаторівневих перетворювачах, DC-шинах і високовольтних машинах локальна напруженість поля може бути нерівномірною, тому геометрія ізоляції та якість поверхонь мають не менше значення, ніж номінальна електрична міцність матеріалу.

5.10. Матеріали систем автоматики, зв’язку і навігації

Електронні системи автоматики та навігації працюють при відносно малих струмах, але часто є критичними для безпеки. Тут важливі стабільність параметрів, стійкість до вологості, корозії, електромагнітних завад та вібрації. Друковані плати, роз’єми, кабелі передачі даних, екрани і корпуси повинні формувати узгоджену систему.

Корозія одного контакту в сигнальному колі може не викликати значного нагрівання, але створити нестабільний сигнал, переривчасту відмову або помилку датчика. Саме такі «плаваючі» дефекти є складними для діагностики, тому чистота, захисні покриття і правильний монтаж набувають особливого значення.

5.11. Пожежна безпека електротехнічних матеріалів

Пожежа на судні має особливо тяжкі наслідки через обмежені можливості евакуації та складність доступу до осередку. Тому для кабельних і полімерних матеріалів важливі показники поширення полум’я, димоутворення, виділення корозійних і токсичних продуктів горіння, а для окремих систем — здатність зберігати функцію певний час під дією вогню.

Не слід ототожнювати терміни «вогнестійкий», «непоширюючий полум’я», «малодимний» і «безгалогенний»: це різні властивості та різні випробування. Для конкретного кабелю або матеріалу необхідно перевіряти маркування і стандарт, за яким підтверджені характеристики.

Матеріалознавче рішення повинно враховувати не тільки поведінку одного полімеру, а й усі елементи конструкції: оболонку, ізоляцію, заповнювачі, кабельні проходки, кріплення та сусідні матеріали. Вогнестійкість системи не дорівнює вогнестійкості одного компонента.

5.12. Діагностика за станом матеріалів

Багато відмов електрообладнання мають матеріалознавчі передумови, які можна виявити до аварії: зміна кольору ізоляції, запах перегрітого полімеру, потемніння контактів, корозійні продукти, мікротріщини, розшарування компаунду, незвичне підвищення температури, падіння опору ізоляції, зростання вібрації або шуму.

Ефективне технічне обслуговування поєднує візуальний контроль, вимірювання електричних параметрів, термографію, аналіз трендів, контроль

вібрації, огляд систем охолодження і лабораторний аналіз там, де це виправдано. Важливо зіставляти результати з базовими значеннями конкретного обладнання, а не лише з універсальними порогами.

Ознака	Можлива матеріалознавча причина	Подальша перевірка
Локальний перегрів клеми	високий контактний опір, корозія, слабкий затиск	момент затягування, поверхня, струм, термографія
Падіння опору ізоляції	волога, забруднення, старіння	очищення, сушіння, повторні вимірювання, огляд
Нестабільний сигнал датчика	корозія роз’єму, волога, тріщина пайки	огляд контактів, вібраційний тест, перевірка кабелю
Зростання шуму трансформатора	послаблення пакета, магнітний режим, механічний резонанс	кріплення, струм, напруга, температура
Часті аварії перетворювача по температурі	погіршення охолодження, деградація теплового інтерфейсу	вентилятори, фільтри, радіатор, термографія

5.13. Приклади вибору матеріалів для суднового обладнання

Обладнання	Елемент	Функціональний матеріал	Критична властивість	Типова загроза
Силовий кабель	струмопровідна жила	мідь / інший допущений провідник	низький опір, гнучкість	нагрів, корозія контактів
Силовий кабель	ізоляція	полімерна система	електрична міцність, теплостійкість	зволоження, старіння, пробій
Генератор	обмотка	мідь + ізоляційна система	провідність і теплостійкість	перегрів, вібрація

Обладнання	Елемент	Функціональний матеріал	Критична властивість	Типова загроза
Генератор/двигун	магнітопровід	електротехнічна сталь	низькі магнітні втрати	перегрів, пошкодження пакета
ГРЩ	шини	мідь/алюміній за проєктом	провідність, термічна стійкість	КЗ, слабкий контакт
Контактор	контакти	спеціальні контактні матеріали	дугостійкість	ерозія, приварювання
Перетворювач	силовий модуль	Si / SiC / інший	кероване перемикання, теплостійкість	перегрів, перенапруга
Дросель	магнітопровід	ферит/порошковий/інший матеріал	низькі втрати на робочій частоті	насичення, нагрів

5.14. Приклад комплексного аналізу: насосний електропривод

Розглянемо судновий насос з асинхронним двигуном, що живиться від частотного перетворювача. Матеріалознавчий ланцюг починається в розподільному щиті: мідні шини і контакти повинні мати низький перехідний опір. Кабель повинен витримувати струм і імпульсний характер напруги. Ізоляція двигуна повинна бути сумісною з режимом живлення. Електротехнічна сталь має працювати без надмірних додаткових втрат. Підшипникова система не повинна зазнавати небезпечних паразитних струмів. Перетворювач повинен відводити тепло від напівпровідникових модулів.

Якщо насос встановлений у вологій зоні, додатково важливі герметизація клемної коробки, матеріали кабельних вводів, антикорозійні покриття і регулярний огляд. Отже, вибір «матеріалу двигуна» фактично є вибором взаємопов’язаної системи матеріалів на всьому шляху енергії.

5.15. Сучасні тенденції

Розвиток електрифікації флоту підвищує роль матеріалів для високоефективних двигунів, силових напівпровідників, акумуляторних систем, DC-розподілу та високовольтних кабелів. Одночасно зростають вимоги до пожежної безпеки, електромагнітної сумісності, моніторингу стану та енергоефективності.

Широкозонні напівпровідники дозволяють підвищувати частоту перемикання і зменшувати втрати, але вимагають відповідних ізоляційних, магнітних і теплових матеріалів. Високоефективні електричні машини стимулюють використання удосконалених електротехнічних сталей і постійних магнітів. У кабельній техніці розвиваються низькодимні, безгалогенні та вогнестійкі системи.

Ще одна тенденція — перехід від регламентного обслуговування лише за календарем до моніторингу фактичного стану. Датчики температури, часткових розрядів, вібрації, вологості і якості електроенергії дозволяють спостерігати деградацію матеріалів у часі. Проте дані датчика мають інтерпретуватися з урахуванням конкретної конструкції та історії експлуатації.

5.16. Узагальнений алгоритм аналізу відмови

1. Зафіксувати симптом: перегрів, пробій, корозія, обрив, нестабільність сигналу, зміна шуму або запаху.
2. Визначити первинну зону пошкодження і не руйнувати сліди до документування.
3. Встановити електричні та теплові режими перед відмовою.
4. Перевірити умови середовища: вода, конденсація, сіль, масло, вентиляція.
5. Оцінити механічні фактори: вібрація, натяг кабелю, ослаблення з’єднання, удар.
6. Дослідити матеріал: зміна кольору, тріщини, ерозія, продукти корозії, сліди дуги.

7. Відрізнити першопричину від вторинних пошкоджень.
8. Порівняти з аналогічними вузлами та історією технічного обслуговування.
9. Сформувати коригувальні дії: заміна матеріалу, зміна конструкції, герметизації, охолодження або регламенту.

5.17. Матриця вибору електротехнічного матеріалу

Для практичного вибору доцільно використовувати матрицю «функція — навантаження — властивість — матеріал — контроль». Спочатку визначають функцію елемента: проводити струм, ізолювати, створювати магнітний потік, відводити тепло або виконувати напівпровідникове перетворення. Далі встановлюють навантаження — електричне, теплове, механічне, кліматичне та хімічне. Лише після цього порівнюють кандидатні матеріали за необхідними властивостями.

Останнім етапом є перевірка експлуатаційної придатності. Матеріал може мати достатню електричну міцність, але бути нестійким до мастила; добру провідність, але проблемний контакт з іншим металом; низькі магнітні втрати, але недостатню механічну стійкість. Системний підхід запобігає ситуації, коли рішення оптимізують за одним показником і погіршують загальну надійність.

5.18. Приклад вибору матеріалів суднового силового кабелю

Розглянемо кабель живлення електродвигуна допоміжного механізму. Для жили потрібна висока електропровідність і достатня гнучкість, тому типовим рішенням є багатодротяний мідний провідник. Для ізоляції потрібні електрична міцність, теплостійкість і стійкість до старіння. Оболонка повинна додатково протистояти вологи, мастилам, механічному стиранню та відповідати пожежним вимогам конкретної зони.

Якщо кабель прокладається на відкритій палубі, зростає роль УФ-стійкості, вологи, температурних коливань і герметизації вводів. Якщо той самий кабель

проходить через машинне відділення, важливими стають температура, можливий контакт із мастилами та пожежні характеристики. Отже, однакова електрична потужність споживача не означає автоматично однакову конструкцію кабелю для різних маршрутів.

5.19. Приклад вибору матеріалів електродвигуна палубного механізму

Для палубного механізму електродвигун зазнає поєднання пускових струмів, змінного навантаження, вологи й температурних коливань. Мідь обмотки повинна мати стабільну провідність, магнітопровід — низькі втрати, а ізоляційна система — витримувати нагрів, вібрацію та зволоження. Корпус і кріпильні елементи мають забезпечувати корозійну стійкість та захист внутрішніх компонентів.

Після ремонту заміна одного матеріалу «аналогом» без перевірки сумісності може бути небезпечною. Інший просочувальний лак може мати несумісну температуру полімеризації або адгезію; інша ізоляційна стрічка — іншу товщину й теплопровідність; інший клемний матеріал — іншу електрохімічну поведінку. Тому ремонтна заміна повинна бути технічно обґрунтованою та відповідати документації виробника або схваленій процедурі.

5.20. Приклад: матеріали частотного перетворювача

Частотний перетворювач поєднує напівпровідникові кристали, мідні шини, ізоляційні підкладки, конденсаторні матеріали, магнітні сердечники, припої, полімерні корпуси та систему охолодження. Надійність визначається ланцюгом теплопередачі від кристалу до навколишнього середовища, якістю електричних контактів, ізоляційними відстанями та стійкістю електроніки до вологості й забруднення.

При експлуатації в машинному відділенні температура повітря і забруднення теплообмінника можуть підвищити температуру силових модулів навіть без зростання електричного навантаження. Це прискорює термомеханічну

втому з’єднань. Тому обслуговування системи охолодження є фактично способом збереження властивостей матеріалів силового модуля.

5.21. Матеріали гібридних та електричних суднових енергосистем

Розвиток електроруху, накопичувачів енергії та берегового живлення збільшує частку силової електроніки й високонавантажених кабельних систем на судні. Це підвищує вимоги до тепловідведення, електроізоляції, контактних матеріалів і магнітних компонентів. У високопотужних системах маса кабельних трас та втрати енергії стають важливими проєктними факторами, а компактність обладнання збільшує щільність тепловиділення.

Нові матеріали не скасовують базових принципів. Чим вища робоча напруга, швидкість перемикання або потужність, тим важливішими стають контроль електричного поля, якість ізоляційних меж, тепловий контакт і чистота монтажу. Тому сучасна електрифікація суден робить матеріалознавчі знання ще більш практично значущими.

5.22. Діагностика і технічне обслуговування за станом матеріалів

Більшість електричних відмов має матеріальний розвиток у часі: окиснення контакту збільшує опір; перегрів змінює полімер; волога знижує поверхневий опір; вібрація розвиває втомну тріщину; теплові цикли пошкоджують пайку. Якщо контролювати проміжні ознаки, відмову можна виявити до втрати функції. Саме на цьому базується технічне обслуговування за фактичним станом.

Інформативними можуть бути тренди опору ізоляції, температура контактів і підшипникових вузлів, вібрація, стан кабельних оболонок, сліди корозії, зміна кольору полімерів, запах перегріву та параметри електричних сигналів. Окремий показник рідко є достатнім. Надійний висновок отримують зіставленням кількох ознак із режимом роботи й історією обладнання.

5.23. Життєвий цикл, ремонтопридатність та екологічні аспекти

Раціональний вибір матеріалу враховує весь життєвий цикл: виробництво, монтаж, експлуатацію, ремонт і утилізацію. Матеріал із вищою початковою вартістю може бути економічно доцільним, якщо зменшує енергетичні втрати, збільшує міжремонтний інтервал або знижує ризик аварійної заміни. Для судна важлива також доступність запасних компонентів у різних портах та можливість виконати ремонт без складного спеціалізованого обладнання.

Екологічність не слід зводити до однієї ознаки. Мають значення енергоефективність протягом служби, довговічність, можливість переробки металів, склад полімерів, безпечність під час пожежі та кількість відходів при заміні. У навчальній інженерній оцінці доцільно порівнювати варіанти за сукупністю технічних, економічних і екологічних критеріїв.

Судновий вузол	Ключові матеріали	Критичні властивості	Типові механізми деградації	Контроль
Силовий кабель	Cu, полімерна ізоляція, оболонка	Провідність, електрична міцність, пожежні та середовищні властивості	Перегрів, зволоження, корозія жили, пошкодження оболонки	Огляд, опір ізоляції, температура з’єднань
Асинхронний двигун	Cu, електротехнічна сталь, емалі, смоли	Провідність, магнітні втрати, теплостійкість ізоляції	Термічне старіння, вібраційне стирання, волога	Температура, опір ізоляції, вібрація
Трансформатор	Cu/Al, магнітопровід, тверда/рідка ізоляція	Магнітні втрати, електрична міцність, тепловідведен	Перегрів, деградація ізоляції, локальні дефекти	Температура, електричні випробування, стан ізоляції

		ня	осердя	
Розподільний щит	Cu-шини, контактні сплави, ізолятори	Низький контактний опір, дугостійкість, поверхневий опір	Ослаблення контактів, корозія, забруднення	Термографія, огляд, затягування за процедурою
Частотний перетворювач	Si/SiC, Cu, кераміка, припої, полімери	Тепловий опір, ізоляція, циклічна довговічність	Теплова втома, корозія плати, деградація конденсаторів	Температура, вентилятори/охолодження, діагностичні журнали

Завдання для самостійної роботи до теми 5

1. Побудуйте матрицю вибору матеріалів для кабелю, що живить палубну лебідку.
2. Складіть ланцюжок «дефект матеріалу → зміна властивості → діагностична ознака → можливий наслідок» для перегрітої клеми.
3. Порівняйте умови роботи електронного перетворювача в кондиційованому електротехнічному приміщенні та в машинному відділенні.
4. Запропонуйте перелік матеріалознавчих параметрів, які варто перевірити перед заміною кабелю на аналог іншого виробника.
5. Поясніть, як вибір матеріалів може впливати на енергоефективність і ремонтопридатність суднової електроенергетичної системи.

Висновки до теми 5

- Електротехнічний виріб є багатоматеріальною системою, а відмова часто виникає на межі матеріалів або функцій.
- Для морського застосування особливо важливі вологостійкість, корозійна стійкість, вібраційна стійкість, пожежна безпека і тепловий режим.
- Матеріал кабелю, двигуна, трансформатора або перетворювача повинен оцінюватися разом із конструкцією і режимом експлуатації.

- Трендовий контроль стану дозволяє виявляти деградацію матеріалів до функціональної відмови.
- Остаточний інженерний вибір повинен відповідати чинним стандартам, правилам класифікаційного товариства і документації виробника.

Контрольні питання до теми 5

1. Опишіть системний алгоритм вибору електротехнічного матеріалу.
2. Які фактори морського середовища є найбільш небезпечними для ізоляції?
3. Чому судновий кабель потрібно розглядати як багатоматеріальну систему?
4. Які матеріали формують основні функціональні частини суднового генератора?
5. Як живлення від частотного перетворювача може змінити вимоги до електродвигуна?
6. Які матеріалознавчі фактори визначають надійність силового електронного модуля?
7. Чому слабке клемне з’єднання може перейти в теплову аварію?
8. Чим відрізняються вимоги до матеріалів для електрообладнання у сухому приміщенні та на відкритій палубі?
9. Назвіть ознаки деградації електротехнічних матеріалів, які можна виявити під час огляду.
10. Чому для проєктного рішення недостатньо лише даних з навчального конспекту?

ПІДСУМКОВІ КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Основні механізми поляризації. Наведіть приклади діелектриків з різними механізмами поляризації.
2. Поясніть залежність діелектричної проникності твердих діелектриків від температури і частоти.
3. Опишіть фізичну сутність процесу електропровідності в діелектриках.
4. Назвіть фактори, що впливають на поверхневу й об’ємну електропровідність.
5. Дайте визначення питомого об’ємного і поверхневого опорів.
6. Викладіть сутність процесу електропровідності в газах та його особливості.
7. Опишіть процеси, що зумовлюють діелектричні втрати.
8. Перелічіть параметри, що характеризують діелектричні втрати.
9. Поясніть зміст схем заміщення діелектрика з втратами.
10. Перелічіть основні види пробою діелектриків.
11. Опишіть процес пробою газів в однорідному електричному полі та фактори впливу.
12. Перелічіть параметри механічних властивостей діелектриків і фактори впливу.
13. Перелічіть параметри хімічної стійкості діелектриків.
14. Наведіть класифікацію провідникових матеріалів.
15. Перелічіть основні характеристики провідникових матеріалів.
16. Поясніть температурну залежність електричного опору металів.
17. Порівняйте мідь і алюміній як провідникові матеріали суднових систем.
18. Поясніть природу контактного опору і причини його зростання в експлуатації.
19. Наведіть класифікацію напівпровідникових матеріалів і поясніть n- та p-тип провідності.
20. Поясніть термоелектричні явища та їх використання в суднових системах вимірювання.
21. Перелічіть основні характеристики магнітних матеріалів.
22. Укажіть причини виникнення магнітних втрат.

23. Перелічіть зовнішні фактори, що впливають на характеристики магнітних матеріалів.
24. Порівняйте магнітом’які та магнітотверді матеріали.
25. Поясніть роль електротехнічної сталі в суднових електричних машинах.
26. Назвіть ключові матеріали суднового кабелю та функцію кожного шару.
27. Назвіть основні матеріали суднового генератора та поясніть їх взаємодію.
28. Які матеріалознавчі особливості характерні для частотних перетворювачів?
29. Як волога, сіль, температура та вібрація впливають на електротехнічні матеріали?
30. Запропонуйте алгоритм вибору матеріалів для електрообладнання відкритої палуби.

УКРАЇНСЬКО-АНГЛІЙСЬКИЙ ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ МІНІМУМ

Український термін	English term
електротехнічний матеріал	electrotechnical material
провідник	conductor
питомий електричний опір	electrical resistivity
електропровідність	electrical conductivity
температурний коефіцієнт опору	temperature coefficient of resistance
контактний опір	contact resistance
діелектрик	dielectric
діелектрична проникність	permittivity
відносна діелектрична проникність	relative permittivity
поляризація	polarization
діелектричні втрати	dielectric losses
тангенс кута діелектричних втрат	dielectric loss tangent
електрична міцність	dielectric strength
пробій	breakdown
об’ємний опір	volume resistance
поверхневий опір	surface resistance
струм витоку	leakage current
трекінг	tracking
електрична дуга	electric arc
напівпровідник	semiconductor
власний напівпровідник	intrinsic semiconductor
домішковий напівпровідник	extrinsic semiconductor
носій заряду	charge carrier
електрон	electron
дірка	hole
заборонена зона	band gap
рівень Фермі	Fermi level
легування	doping
ефект Зеєбека	Seebeck effect
ефект Пельтьє	Peltier effect
магнітна індукція	magnetic flux density
напруженість магнітного поля	magnetic field strength
магнітна проникність	magnetic permeability
коерцитивна сила	coercive field
залишкова індукція	remanence
гістерезис	hysteresis
магнітом’який матеріал	soft magnetic material

Український термін	English term
магнітотвердий матеріал	hard magnetic material
електротехнічна сталь	electrical steel
вихрові струми	eddy currents
магнітопровід	magnetic core
обмотка	winding
судновий кабель	shipboard cable
головний розподільний щит	main switchboard
частотний перетворювач	variable frequency drive / frequency converter
силова електроніка	power electronics
конформне покриття	conformal coating
сольовий туман	salt mist / salt spray
тепловий опір	thermal resistance
старіння ізоляції	insulation ageing

ЛІТЕРАТУРА

1. Стальніченко О. І. Матеріалознавство та технологія матеріалів : підручник. Одеса : ОНМУ, 2024. 306 с.

2. Стальніченко О. І. Організація і проведення наукових та експериментальних досліджень : навч. посібник. Одеса : ОНМУ, 2023. 50 с.

3. Стальніченко О. І., Смаглій В. М., Козішкурт Є. М., Шамов О. В. Українсько-англійський технічний ілюстрований словник. Одеса : ОНМУ, 2022. 65 с.

4. Бузило В. І., Сердюк В. П., Яворський А. В., Гайдай О. А. Матеріалознавство : навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 243 с.

5. Callister W. D. Jr., Rethwisch D. G. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. 6th ed. Wiley, 2022.

6. Ginzburg V. V., Hall L. M. Theory and Modeling of Polymer Nanocomposites. Springer, 2021.

7. IEC 60092-101:2018. Electrical installations in ships — Part 101: Definitions and general requirements.

8. IEC 60092-201:2019. Electrical installations in ships — Part 201: System design — General.

9. IEC 60092-202:2016. Electrical installations in ships — Part 202: System design — Protection.

10. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as amended. Chapter II-1: Construction — Subdivision and stability, machinery and electrical installations.

11. IACS Unified Requirement E10, Rev.10 (Aug 2024). Test Specification for Type Approval.

12. IEC 60092-350:2020. Electrical installations in ships — Part 350: General construction and test methods of power, control and instrumentation cables for shipboard and offshore applications.

13. IEC 60092-360:2021. Electrical installations in ships — Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables.

14. IEC 60092-302-2:2025. Electrical installations in ships — Part 302-2: Low voltage switchgear and controlgear assemblies — Marine power.