



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

21 лекція, 42 години. П'ять змістових модулів

Дисципліна: Фізика (ОК 11)

Галузь знань: G — Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G5 — Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка

Освітньо-професійна програма: «Експлуатація та технічне обслуговування радіоелектронного, телекомунікаційного і мережевого обладнання»

Освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

Розробник: викладач фізики Дзюбанов Володимир Андрійович

ПЕРЕДМОВА

Конспект розроблено як основне навчальне джерело з дисципліни «Фізика» для здобувачів спеціальності G5 — Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка відповідно до п. 1.8 освітньо-професійної програми, який передбачає використання власних навчально-методичних розробок педагогічних працівників.

Його призначення — не переказати підручник загальної фізики, а відібрати з нього те, що безпосередньо працює в експлуатації, діагностиці та ремонті радіоелектронного, телекомунікаційного і мережевого обладнання, і подати у зв'язці з приладами, з якими ви матимете справу: мультиметром, осцилографом, генератором сигналів, паяльною станцією, антенно-фідерним трактом, оптоволоконною лінією, акумулятором і силовою установкою БПЛА.

Дисципліна закріплена за програмними результатами навчання РН 2 (знати фізичні закони та явища, основи електротехніки, необхідні для подальшого навчання) і РН 16, а з фахових компетентностей — за СК 6 (здатність виявляти типові несправності телекомунікаційного і радіотехнічного обладнання за результатами інструментальних вимірювань). Звідси наскрізна логіка курсу: від фізичної величини та її вимірювання — до пояснення, чому прилад показує саме це, і що саме в обладнанні несправне.

Структура курсу відповідає загальноприйнятій послідовності розділів фізики, тому конспект узгоджується з підручниками, доступними в Електронній бібліотеці ІМЗО: механіка — молекулярна фізика і термодинаміка — електрика і магнетизм — коливання, хвилі та оптика — атомна і ядерна фізика. Порівняно з загальноосвітнім курсом посилено модуль III «Електрика і магнетизм»: він є безпосереднім теоретичним підґрунтям дисциплін «Теорія електричних та магнітних кіл», «Основи електроніки», «Сигнали і процеси в радіотехніці», «Схемотехніка» та «Електричні вимірювання».

Кожна лекція побудована однаково: план, теоретичний виклад із виходом на конкретне застосування, перелік ключових формул і питання для самоконтролю. Питання для самоконтролю не є формальністю — саме на їх основі формуються завдання модульних контролів.

Розподіл матеріалу за модулями

№	Модуль	Лекції, год	Практ., год	СРС, год	Разом	Семестр
I	Механіка та основи гідростатики	4 (8)	3 (6)	9	23	I
II	Молекулярна фізика і термодинаміка	4 (8)	3 (6)	9	23	I
III	Електрика і магнетизм	8 (16)	5 (10)	18	44	I
IV	Коливання, хвилі та оптика	3 (6)	3 (6)	8	20	II
V	Атомна та ядерна фізика	2 (4)	1 (2)	4	10	II
	РАЗОМ	21 (42)	15 (30)	48	120	

Модульний контроль № 1 охоплює модулі I–II, модульний контроль № 2 — модулі III–V. I семестр (54 аудиторні години) завершується опрацюванням модуля III, II семестр (18 аудиторних годин) — модулями IV–V і диференційованим заліком.

МОДУЛЬ I. МЕХАНІКА ТА ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ

4 лекції, 8 годин

ЛЕКЦІЯ 1. ФІЗИКА ЯК НАУКА. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ, СІ, ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОХИБКИ

План лекції

1. Предмет і метод фізики. Явище, модель, закон, теорія.
2. Фізичні величини. Міжнародна система одиниць СІ. Кратні та частинні префікси.
3. Прямі та непрямі вимірювання. Засоби вимірювальної техніки.
4. Похибки вимірювань. Клас точності приладу. Обробка результатів.

1. Предмет фізики та її місце в підготовці техніки-електроніки

Фізика вивчає найзагальніші властивості матерії та форми її руху. Її метод складається з чотирьох ланок: спостереження явища, висунення гіпотези, побудова моделі й перевірка висновків експериментом. Якщо модель витримує перевірку в широкому колі умов, вона стає законом, а система пов'язаних законів — теорією.

Кожна фізична модель має межі застосовності. Закон Ома справджується для металевих резисторів, але не для діодів; модель зосередженого елемента працює, доки розміри схеми набагато менші за довжину хвилі сигналу, а на частотах гігагерцового діапазону той самий провідник доводиться розглядати як лінію передачі. Уміння бачити межу моделі — головне, що відрізняє інженера від користувача формул.

2. Фізичні величини та СІ

Сім основних одиниць СІ: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль, кандела. Усі інші є похідними: вольт, ом, фарад, генрі, герц, ват, тесла, вебер. Ампер — основна одиниця, і це не випадковість: саме через силу струму історично визначено всю електричну метрологію.

Префікси в електроніці вживаються постійно: піко-, нано- і мікрофаради для конденсаторів, мікро- та мілігенрі для дроселів, кіло- і мегаоми для резисторів, мега- і гігагерци для сигналів. Типова помилка початківця — сплутати мкФ і нФ у специфікації, після чого фільтр живлення перестав працювати, хоча зібраний «за схемою».

3. Вимірювання прямі та непрямі

Пряме вимірювання дає значення безпосередньо за шкалою приладу: напруга вольтметром, струм амперметром, частота частотоміром. Непряме — обчислюється за формулою з результатів прямих: опір за законом Ома, потужність за добутком напруги і струму, ємність — за сталою часу RC-кола.

Важливо, що прилад завжди втручається в коло. Вольтметр із входним опором 10 МОм, підключений паралельно резистору 1 МОм, занижує показ приблизно на 9 %. Осцилографічний щуп додає до вузла ємність у кілька десятків пікофарад, яка може зірвати

генерацію високочастотного каскаду. Це не «поламаний прилад», а фізичний наслідок самого акту вимірювання.

4. Похибки та клас точності

Систематична похибка повторюється і зміщує результат в один бік: незакалібрований прилад, неврахований опір щупів, температурний дрейф. Її усувають калібруванням і поправками. Випадкова похибка змінює знак і величину від досліду до досліду; її зменшують багаторазовим вимірюванням і усередненням. Промах — груба помилка оператора чи збій, такий результат відкидають.

Клас точності приладу задає зведену похибку у відсотках від верхньої межі діапазону. Мультиметр класу 1,5 з межею 200 В дає абсолютну похибку близько 3 В незалежно від того, вимірюєте ви 180 В чи 10 В. Звідси практичне правило: вибирайте межу так, щоб показ припадав на останню третину шкали.

Результат записують із похибкою і в узгоджених одиницях: $U = (12,4 \pm 0,3) \text{ В}$. Число значущих цифр у відповіді не може перевищувати точності вихідних даних — «розрахунок» на вісім знаків після коми в паспорті мультиметра класу 1,5 не має фізичного змісту.

Ключові формули

- Абсолютна похибка: $\Delta x = |x - x_0|$; відносна: $\delta = \Delta x / x \cdot 100 \%$
- Зведена похибка (клас точності): $\gamma = \Delta x / x_{\max} \cdot 100 \%$
- Середнє арифметичне: $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$
- Похибка непрямого вимірювання (добуток/частка): $\delta = \delta_1 + \delta_2$

Питання для самоконтролю

1. Мультиметр класу точності 1,0 має межу 20 В. Яка абсолютна похибка вимірювання напруги 3 В і чому доцільніше перейти на межу 20 В $\rightarrow$ 2 В?
2. Чому вхідний опір вольтметра має бути якомога більшим, а амперметра — якомога меншим?
3. Наведіть приклад фізичної моделі з курсу електроніки та вкажіть межу її застосовності.

ЛЕКЦІЯ 2. КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

План лекції

1. Механічний рух. Переміщення, швидкість, прискорення.
2. Три закони Ньютона. Маса та сила.
3. Сили в техніці: тяжіння, пружності, тертя.
4. Рух під дією кількох сил. Перевантаження та вібрація в апаратурі.

1. Кінематика

Механічний рух описують відносно системи відліку. Основні величини — переміщення, швидкість і прискорення. Рівноприскорений рух повністю визначається початковою швидкістю та прискоренням; саме він описує розгін квадрокоптера, падіння інструмента з висоти й рух каретки координатного столу монтажного автомата.

Криволінійний рух додає доцентрове прискорення. Для ротора двигуна БПЛА, що обертається з частотою 10 000 об/хв, доцентрове прискорення на кінці лопаті сягає десятків тисяч g — тому найменший дисбаланс гвинта створює вібрацію, яка руйнує паяні з'єднання плати польотного контролера.

2. Закони Ньютона

Перший закон визначає інерціальні системи відліку: тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки на нього не діє некомпенсована сила. Другий пов'язує прискорення з рівнодією сил і масою. Третій стверджує рівність сил дії та протидії, прикладених до різних тіл.

Третій закон безпосередньо пояснює політ мультикоптера: гвинт відкидає повітря вниз, повітря діє на гвинт вгору. Тяга дорівнює добутку масової витрати повітря на приріст його

швидкості, тому більший гвинт на менших обертах ефективніший за малий на високих — це фізична причина, чому «повільні» гвинти великого діаметра дають довший політ на тій самій батареї.

3. Сили в техніці

Сила тяжіння визначає вагу апаратури та навантаження на кріплення антени. Сила пружності підпорядкована закону Гука; вона працює в пружинних контактах роз'ємів, у притискових лапках радіаторів і в амортизаційних підвісах камери. Ослаблений пружинний контакт — типова причина «плаваючої» несправності, що зникає при постукуванні по блоку.

Сила тертя спокою утримує різьбове з'єднання, а тертя ковзання зношує механізм приводу антени. Віб्राція знижує ефективне тертя спокою, і саме тому кріплення на щоглі й у відсіку БПЛА фіксують контргайками, шайбами Гровера або фіксатором різьби.

4. Рух під дією кількох сил

Задача розв'язується стандартно: обрати систему відліку, зобразити всі сили, записати другий закон у проєкціях на осі, розв'язати систему. Цей алгоритм повністю переноситься на розрахунок кіл за законами Кірхгофа в модулі III — змінюється лише фізичний зміст величин.

Механічні перевантаження нормуються для апаратури: транспортна тряска, удар при посадці БПЛА, вітрове навантаження на антену. Значення в g перераховують у силу через масу блока, і саме ця сила визначає переріз кронштейна та кількість точок кріплення.

Ключові формули

- Рівноприскорений рух: $v = v_0 + at$; $s = v_0t + at^2/2$
- Другий закон Ньютона: $F = ma$; рівнодійна: $\Sigma F = ma$
- Доцентрове прискорення: $a = v^2/r = \omega^2 r$
- Закон Гука: $F = kx$; сила тертя: $F_{\text{тер}} = \mu N$

Питання для самоконтролю

1. Блок апаратури масою 2,5 кг витримує перевантаження 6 g. Яка сила діє на кріплення?
2. Чому гвинт більшого діаметра на менших обертах дає більший час польоту при тій самій потужності?
3. Як вібрація впливає на різьбові з'єднання та паяні контакти й чим цьому запобігають?

ЛЕКЦІЯ 3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ККД

План лекції

1. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.
2. Механічна робота та потужність.
3. Кінетична й потенціальна енергія. Закон збереження енергії.
4. Коефіцієнт корисної дії. Енергетичний баланс пристрою.

1. Імпульс і закон збереження

Імпульс — добуток маси на швидкість. У замкненій системі векторна сума імпульсів не змінюється. Реактивний принцип, що впливає звідси, працює однаково в ракеті й у струмені повітря під гвинтом БПЛА.

2. Робота і потужність

Робота дорівнює добутку сили на переміщення і на косинус кута між ними; сила, перпендикулярна до переміщення, роботи не виконує. Потужність — робота за одиницю часу, вимірюється у ватах.

Ват є спільною одиницею для механіки й електрики, і це ключ до всієї енергетики пристрою: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$. Механічна потужність на валу двигуна БПЛА та електрична потужність, узята від акумулятора, вимірюються в тих самих одиницях і відрізняються лише на втрати.

3. Енергія та закон збереження

Кінетична енергія залежить від квадрата швидкості, потенціальна в полі тяжіння — від висоти. У замкненій системі без тертя повна механічна енергія зберігається; за наявності тертя частина переходить у внутрішню енергію, тобто в нагрівання.

Закон збереження енергії у формі енергетичного балансу — головний інструмент перевірки будь-якого технічного розрахунку. Якщо в балансі пристрою «зайва» енергія, помилка в розрахунку, а не у природі. Це найпростіший і найнадійніший критерій оцінювання реклами «надефективних» зарядних пристроїв і «вічних» джерел живлення.

4. ККД

ККД — відношення корисної енергії до затраченої, завжди менше одиниці. У послідовному ланцюзі перетворень загальний ККД дорівнює добутку часткових. Для БПЛА ланцюг такий: акумулятор → регулятор обертів → двигун → гвинт → повітря. Навіть за ККД кожної ланки 0,9 загальний становить близько 0,66, і третина енергії батареї перетворюється на теплоту та шум.

Практичний наслідок: підвищувати варто ККД найслабшої ланки. Заміна регулятора з ККД 0,85 на модель із 0,95 дає більший приріст, ніж «розгін» уже ефективного двигуна.

Ключові формули

- Імпульс: $p = mv$; закон збереження: $\Sigma p = \text{const}$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$; потужність: $P = A/t = F \cdot v$
- Енергія: $E_k = mv^2/2$; $E_p = mgh$
- ККД: $\eta = A_{\text{кор}}/A_{\text{затр}} \cdot 100 \%$; ланцюг: $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$

Питання для самоконтролю

1. Акумулятор БПЛА має запас енергії 88,8 Вт·год. За ККД силової установки 0,65 яка корисна енергія доступна на гвинті?
2. Чому загальний ККД ланцюга завжди менший за ККД найгіршої ланки?
3. На якій підставі можна одразу відхилити пропозицію пристрою з ККД 110 %?

ЛЕКЦІЯ 4. ОСНОВИ ГІДРО- ТА АЕРОСТАТИКИ. ПОТІК ПОВІТРЯ В АПАРАТУРІ

План лекції

1. Тиск. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск.
2. Закон Архімеда. Атмосферний тиск і висота.
3. Рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі.
4. В'язкість, аеродинамічний опір, охолодження повітряним потоком.

1. Тиск і закон Паскаля

Тиск — сила, що діє на одиницю площі, вимірюється в паскалях. Закон Паскаля: тиск, створений у рідині чи газі, передається в усі боки однаково. Гідростатичний тиск зростає з глибиною пропорційно густині та висоті стовпа.

Для електроніки це має прямий сенс: герметичні корпуси зовнішнього обладнання (вуличні точки доступу, бокси базових станцій) нормують за ступенем захисту IP, який визначається саме здатністю витримати тиск струменя води. А герметичний бокс, зібраний у теплому приміщенні й винесений на мороз, створює всередині розрідження і втягує вологе повітря через найменшу нещільність — звідси конденсат на платі.

2. Закон Архімеда й атмосфера

Виштовхувальна сила дорівнює вазі витісненої рідини або газу. Атмосферний тиск на рівні моря становить близько 101 кПа і спадає з висотою; на цьому принципі працює барометричний висотомір БПЛА, який вимірює не висоту, а тиск, і перераховує його. Саме тому різка зміна погоди дає дрейф показів висоти на кілька метрів, а політ поблизу будівель із завихреннями повітря — стрибки барометричної висоти.

3. Рівняння нерозривності й Бернуллі

Через будь-який переріз труби за одиницю часу проходить однакова об'ємна витрата: де переріз менший, швидкість більша. Рівняння Бернуллі додає: там, де швидкість потоку

більша, статичний тиск менший. Це й створює підйомну силу на профілі лопаті гвинта та крила.

4. Охолодження потоком повітря

Вентилятор блока апаратури характеризують витратою повітря та створюваним напором. Забитий пилом фільтр збільшує аеродинамічний опір тракту, витрата падає, а разом із нею — тепловідведення. Температура кристалів зростає, і апаратура або знижує частоту, або йде в аварійне вимкнення. Це найпоширеніша «несправність» вуличних і серверних блоків, яка усувається чищенням, а не заміною плат.

Ламінарний потік біля стінки утворює загальмований шар, що погіршує тепловіддачу; турбулізація потоку ребрами радіатора цей шар руйнує. Звідси форма ребер сучасних радіаторів — не декоративна.

Ключові формули

– Тиск: $p = F/S$; гідростатичний: $p = \rho gh$

– Закон Архімеда: $F_a = \rho g V$

– Нерозривність: $S_1 v_1 = S_2 v_2$

– Бернуллі: $p + \rho v^2/2 + \rho gh = \text{const}$

Питання для самоконтролю

1. Чому в герметичному вуличному боксі утворюється конденсат і як цьому запобігають?
2. Барометричний висотомір БПЛА показав зниження на 4 м при нерухомому апараті. Яка фізична причина?
3. Як забруднення пиловим фільтром впливає на тепловий режим блока апаратури?

МОДУЛЬ II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

4 лекції, 8 годин

ЛЕКЦІЯ 5. ОСНОВИ МКТ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ТЕМПЕРАТУРА ТА ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

План лекції

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Ідеальний газ. Рівняння стану. Ізопроееси.
3. Температура як міра середньої кінетичної енергії. Шкали температур.
4. Вимірювання температури в радіоелектронній апаратурі.

1. Положення МКТ

Речовина складається з частинок, які перебувають у безперервному хаотичному русі й взаємодіють між собою. Підтвердження — броунівський рух і дифузія. Тиск газу на стінку є усередненим результатом ударів величезної кількості молекул; звідси впливає статистичний характер усіх молекулярних законів.

2. Ідеальний газ

Модель ідеального газу нехтує розмірами молекул і силами притягання між ними. Рівняння стану пов'язує тиск, об'єм і температуру. Ізотермічний, ізобарний та ізохорний процеси є його частковими випадками.

Модель має чітку межу: при високих тисках і низьких температурах газ конденсується, і рівняння перестає працювати. Саме тому холодоагенти й гази в теплових трубках описують не ним, а діаграмами стану.

3. Температура

Температура — міра середньої кінетичної енергії хаотичного руху частинок. Шкала Кельвіна відлічується від абсолютного нуля, шкала Цельсія зміщена на 273,15. У документації на компоненти діапазони подають у градусах Цельсія: побутовий 0...+70 °С, промисловий –40...+85 °С, автомобільний і військовий — ширші.

Це не формальність. Електролітичний конденсатор, розрахований на 85 °С, поруч із радіатором силового ключа проживе в рази менше: емпіричне правило подвоєння швидкості деградації на кожні 10 °С перегріву пояснює більшість «раптових» відмов блоків живлення через два-три роки.

4. Як вимірюють температуру в апаратурі

Терморезистор (термістор) змінює опір із температурою — саме його вбудовують у корпус акумулятора БПЛА, щоб заборонити заряд на морозі. Термопара використовує термоЕРС контакту двох металів і застосовується в паяльних станціях для стабілізації температури жала. Напівпровідникові датчики вбудовують у процесори й трансивери. Безконтактно температуру вимірює пірометр і тепловізор — за тепловим випромінюванням (лекція 19). Ключова умова коректного вимірювання — тепловий контакт. Датчик, притиснутий без термопасти, показує температуру повітря, а не корпусу.

Ключові формули

- Рівняння стану ідеального газу: $pV = (m/M)RT$
- Об'єднаний газовий закон: $p_1V_1/T_1 = p_2V_2/T_2$
- Зв'язок шкал: $T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15$
- Середня кінетична енергія молекули: $E = 3kT/2$

Питання для самоконтролю

1. Чому конденсатор із температурним діапазоном до 85 °С не можна ставити впритул до радіатора силового ключа?
2. У чому фізична різниця між термістором і термопарою як датчиками температури?
3. Герметичний бокс нагрівся від 0 °С до 40 °С. Як змінився тиск усередині при незмінному об'ємі?

ЛЕКЦІЯ 6. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ, ТЕПЛОТА, ТЕПЛОЄМНІСТЬ

План лекції

1. Внутрішня енергія та способи її зміни.
2. Кількість теплоти. Питома теплоємність.
3. Перший закон термодинаміки.
4. Тепловиділення в електронних компонентах. Теплова стала часу.

1. Внутрішня енергія

Внутрішня енергія тіла — сумарна енергія хаотичного руху та взаємодії його частинок. Змінити її можна двома способами: виконанням роботи над тілом або передаванням теплоти. Для електронної апаратури практично весь приріст внутрішньої енергії — це теплота, що виділяється при проходженні струму.

2. Кількість теплоти й теплоємність

Кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла, пропорційна масі, питомій теплоємності та зміні температури. Питома теплоємність алюмінію близько 900, міді 385, води 4200 Дж/(кг·К).

Звідси зрозуміло, чому радіатор роблять із алюмінію: він дешевий, легкий і має велику теплоємність на одиницю маси, а мідь застосовують там, де критична швидкість відведення теплоти від малої площі кристала — у теплорозподільниках і тепловідвідних вставках.

3. Перший закон термодинаміки

Теплота, надана системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії та на виконання роботи. Це закон збереження енергії для теплових процесів. Для блока апаратури він набуває вигляду теплового балансу: уся спожита електрична потужність, за винятком частки, що пішла в корисний сигнал або механічну роботу, зрештою перетворюється на теплоту й має бути відведена в довкілля.

Для більшості блоків зв'язку корисна випромінена потужність мала порівняно зі спожитою, тому в першому наближенні вважають: скільки блок споживає — стільки й гріє.

4. Теплова стала часу

Компонент нагрівається не миттєво: зростання температури описується експонентою з тепловою сталою часу, що дорівнює добутку теплоємності на тепловий опір. Мале жало паяльника має малу сталу й розігрівається за секунди; масивний радіатор — за десятки хвилин.

Практичний наслідок для діагностики: короточасне перевантаження може не встигнути нагріти корпус, але перепалити кристал, бо в самого кристала стала часу — мілісекунди. Тому захист за температурою корпусу не рятує від імпульсного перевантаження, для цього потрібен струмовий захист.

Ключові формули

- Кількість теплоти: $Q = cm\Delta T$
- Перший закон термодинаміки: $\Delta U = Q - A$ ($Q = \Delta U + A$)
- Потужність тепловиділення: $P = UI = I^2R$
- Теплова стала часу: $\tau = C \cdot R_t$

Питання для самоконтролю

1. Алюмінієвий радіатор масою 0,25 кг нагрівся на 30 К. Скільки теплоти він поглинув?
2. Чому захист за температурою корпусу не захищає кристал від імпульсного перевантаження?
3. Блок споживає 45 Вт і майже не має механічних та випромінювальних втрат. Яку теплову потужність має відвести його система охолодження?

ЛЕКЦІЯ 7. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТЕПЛОВИЙ ОПІР І ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ РЕА

План лекції

1. Три механізми передавання теплоти.
2. Теплопровідність. Закон Фур'є.
3. Тепловий опір ланцюга «кристал — корпус — радіатор — середовище».
4. Розрахунок і вибір радіатора. Термоінтерфейси.

1. Три механізми

Теплопровідність переносить теплоту в самій речовині без переміщення речовини — так теплота йде від кристала через корпус у радіатор. Конвекція переносить її разом із рухом газу чи рідини — так радіатор віддає теплоту повітрю; вимушена конвекція від вентилятора в рази інтенсивніша за природну. Теплове випромінювання не потребує середовища і стає помітним при значних перегрівках; саме воно дозволяє тепловізору «бачити» гарячий компонент.

2. Закон Фур'є

Тепловий потік через шар пропорційний коефіцієнту теплопровідності, площі та різниці температур і обернено пропорційний товщині шару. Теплопровідність міді близько 390, алюмінію 200, склотекстоліту FR-4 лише 0,3 Вт/(м·К).

Останнє число пояснює конструкцію друкованих плат: сам текстоліт теплоти майже не проводить, тому теплоту від компонента відводять мідними полігонами і масивом перехідних отворів під корпусом. «Теплові» via — не прикраса розведення, а єдиний шлях теплоти крізь плату.

3. Тепловий опір ланцюга

Тепловий опір — це різниця температур на одиницю теплового потоку, вимірюється в К/Вт. Опори послідовних ділянок додаються, точнісінько як електричні опори послідовно з'єднаних резисторів. Ця аналогія повна: температура відповідає потенціалу, тепловий потік — струму.

Ланцюг типового силового компонента: кристал → корпус (задано в даташиті), корпус → радіатор (визначається термоінтерфейсом), радіатор → повітря (паспорт радіатора). Знаючи розсіювану потужність і граничну температуру кристала, обчислюють допустимий сумарний тепловий опір і добирають радіатор.

4. Термоінтерфейси

Між двома плоскими поверхнями реальний контакт становить одиниці відсотків площі, решту займає повітря з теплопровідністю $0,026 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Термопаста витісняє повітря і знижує перехідний тепловий опір у рази. Надлишок пасти шкідливий так само, як її відсутність: товстий шар сам стає тепловим опором.

Слюдяна або керамічна прокладка ізолює електрично, але додає тепловий опір, і це обов'язково враховують у розрахунку. Відновлюючи блок після ремонту, термопасту заміняють завжди — висохла паста є типовою прихованою причиною повторного перегріву.

Ключові формули

- Закон Фур'є: $Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T \cdot \tau / d$; тепловий потік: $q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / d$
- Тепловий опір: $R_t = \Delta T / P$; шару: $R_t = d / (\lambda S)$
- Послідовний ланцюг: $R_t \text{ заг} = R_t(\text{кр-к}) + R_t(\text{к-р}) + R_t(\text{р-с})$
- Температура кристала: $T_{\text{кр}} = T_{\text{сер}} + P \cdot R_t \text{ заг}$

Питання для самоконтролю

1. Транзистор розсіює 12 Вт, повний тепловий опір ланцюга 4 К/Вт, температура повітря 35 °С. Яка температура кристала?
2. Чому теплопровідність FR-4 вимагає застосування теплових перехідних отворів?
3. Чому надлишковий шар термопасти погіршує охолодження?

ЛЕКЦІЯ 8. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ, ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ, ВОЛОГІСТЬ. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Теплове розширення твердих тіл. Температурний коефіцієнт лінійного розширення.
2. Фазові переходи. Плавлення припою й фізика паяння.
3. Вологість повітря. Точка роси й конденсат в апаратурі.
4. Другий закон термодинаміки. Незворотність і деградація.

1. Теплове розширення

Лінійні розміри тіл зростають із температурою; коефіцієнт розширення для міді близько $17 \cdot 10^{-6}$, для склотекстоліту вздовж плати близько $14 \cdot 10^{-6}$, а для керамічного корпусу компонента — $6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Ця розбіжність і є фізичною причиною руйнування паяних з'єднань при термоциклах: при кожному нагріванні й охолодженні шов SMD-компонента зазнає зсувної деформації. Через сотні циклів утворюється мікротріщина, і виникає плаваючий контакт, який мультиметром у холодному стані не виявляється, але зникає при прогріванні феном. Саме тому великі керамічні конденсатори не ставлять на краю плати, яка згинається.

2. Фазові переходи й паяння

При плавленні теплота йде на руйнування кристалічної ґратки, а температура не змінюється — це питома теплота плавлення. Олов'яно-свинцевий припій ПОС-61 має евтектичну точку близько 183 °С і плавиться без пастоподібної стадії; безсвинцеві сплави SAC плавляться біля 217–220 °С, і саме тому їх паяють гарячіше і вони гірше змочують.

Змочування — фізична основа паяння: розплавлений припій утворює з металом шар інтерметаліду. Оксидна плівка змочуванню перешкоджає, тому потрібен флюс. Холодна пайка — це не «мало припою», а недостатня температура або недостатній час, за яких інтерметалідний шар не утворився; такий шов зовні тьмянний, зернистий і дає той самий плаваючий контакт.

3. Вологість і точка роси

Абсолютна вологість — маса пари в одиниці об'єму, відносна — відношення фактичної густини пари до насиченої при даній температурі. Точка роси — температура, при якій пара стає насиченою і випадає конденсат.

Звідси правило експлуатації: блок, занесений із морозу в тепле приміщення, покривається конденсатом, і вмикати його не можна, доки він не прогріється до температури приміщення. Той самий механізм працює у вуличних боксах і в антенному фідері: волога, що

конденсується всередині кабелю, різко збільшує загасання тракту. Проти цього застосовують герметизацію роз'ємів, вентилявані мембрани й осушувачі.

4. Другий закон термодинаміки

Теплота самочинно переходить лише від гарячішого тіла до холоднішого; усі реальні процеси незворотні. Неможливо повністю перетворити теплоту на роботу — це зумовлює скінченний ККД будь-якого перетворювача.

Для експлуатації апаратури другий закон означає простий висновок: усяка деградація — окиснення контактів, висихання електроліту, розтріскування паяних швів — іде в один бік. Технічне обслуговування не «зупиняє» цей процес, а лише уповільнює його, тому регламент ТО має періодичний, а не разовий характер.

Ключові формули

- Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$
- Теплота плавлення: $Q = \lambda m$; пароутворення: $Q = r m$
- Відносна вологість: $\varphi = \rho / \rho_n \cdot 100 \%$
- ККД теплової машини: $\eta \leq (T_1 - T_2) / T_1$

Питання для самоконтролю

1. Чому безсвинцеві припої вимагають вищої температури паяння і як це впливає на ризик пошкодження компонента?
2. Алюмінієвий хвилевід довжиною 2 м нагрівся на 50 К. На скільки він подовжився ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)?
3. Чому апаратуру, занесену з морозу, не можна одразу вмикати? # МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

8 лекцій, 16 годин

ЛЕКЦІЯ 9. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАКОН КУЛОНА. НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ, НАПРУГА

План лекції

1. Електричний заряд. Закон збереження заряду. Закон Кулона.
2. Електричне поле. Напруженість. Силові лінії.
3. Потенціал і напруга. Робота поля.
4. Провідники й діелектрики в полі. Електростатичний розряд і захист від нього.

1. Заряд і закон Кулона

Електричний заряд дискретний і кратний елементарному заряду електрона. У замкненій системі алгебраїчна сума зарядів зберігається. Сила взаємодії двох точкових зарядів прямо пропорційна їх добутку й обернено пропорційна квадрату відстані; у середовищі з діелектричною проникністю ϵ вона зменшується в ϵ разів.

2. Напруженість поля

Електричне поле — форма матерії, через яку заряди взаємодіють. Його силова характеристика — напруженість, чисельно рівна силі, що діє на одиничний позитивний заряд. Поле зображують силовими лініями, які починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах.

Напруженість поблизу вістря різко зростає — саме тому розряд починається з гострих країв. Це фізична основа і громовідводу, і розрядників газонаповнених захисних приладів, і вимоги скруглювати провідники високовольтних кіл на платі.

3. Потенціал і напруга

Потенціал — енергетична характеристика поля, робота з переміщення одиничного заряду в нескінченність. Напруга між двома точками — різниця потенціалів; саме її показує вольтметр. Абсолютного потенціалу в схемі не існує: усі покази прив'язані до обраної точки, яку називають «землею» схеми.

Звідси типова помилка вимірювання: підключення «землі» осцилографа до точки, яка не є спільною, створює коротке замикання через захисне заземлення приладу. Для вимірювань

у колах без гальванічної розв'язки застосовують диференціальний щуп або розділовий трансформатор.

4. Провідник, діелектрик і ESD

У провіднику вільні заряди перерозподіляються так, що поле всередині зникає — це електростатичний захист (клітка Фарадея), який реалізується екранувальним корпусом блока й обплетенням кабелю. У діелектрику вільних зарядів немає, відбувається поляризація.

Тіло людини, що пройшла по синтетичному покриттю, набуває потенціалу в кілька кіловольт. Розряд такого потенціалу непомітний для людини, але руйнує тонкий підзатворний діелектрик МОН-транзистора — компонент або відмовляє одразу, або деградує й виходить з ладу згодом. Тому робоче місце монтажника обладнують антистатичним килимком, браслетом із резистором 1 МОм і заземленою паяльною станцією, а компоненти зберігають у провідних пакетах.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 q_2 / (\epsilon r^2)$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
- Напруженість: $E = F/q$; поля точкового заряду: $E = kq / (\epsilon r^2)$
- Потенціал: $\phi = W/q$; напруга: $U = \phi_1 - \phi_2$
- Однорідне поле: $U = E \cdot d$

Питання для самоконтролю

1. Чому заряд на тілі людини в кілька кіловольт небезпечний для МОН-транзистора, але не для людини?
2. Яка роль резистора 1 МОм в антистатичному браслеті?
3. Чому не можна довільно підключати «землю» осцилографа до будь-якої точки схеми?

ЛЕКЦІЯ 10. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

План лекції

1. Електроємність. Плоский конденсатор.
2. Діелектрична проникність і типи діелектриків.
3. З'єднання конденсаторів. Енергія поля.
4. Конденсатор у реальній схемі: ESR, напруга, деградація.

1. Ємність

Ємність — здатність провідника або системи провідників накопичувати заряд; вона дорівнює відношенню заряду до напруги й вимірюється у фарадах. Ємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі обкладок і діелектричній проникності та обернено пропорційна відстані між обкладками.

Із цієї формули випливає вся конструкція сучасних компонентів: багатошаровий керамічний конденсатор (MLCC) — це десятки тонких шарів, увімкнених паралельно; електролітичний — згорнута в рулон стрічка з оксидною плівкою товщиною часток мікрометра, звідки й величезна ємність при малих розмірах.

2. Діелектрики

Діелектрична проникність показує, у скільки разів поле в середовищі слабше за поле у вакуумі. У поліпропілену вона близько 2,2, у кераміки класу X7R — тисячі. Але висока проникність оплачується нестабільністю: керамічні конденсатори класу X7R і Y5V помітно втрачають ємність із зростанням постійної напруги зміщення та температури, іноді більш ніж наполовину від номіналу. Тому в часозадавальних колах ставлять NP0/C0G, а не X7R. Пробій діелектрика відбувається, коли напруженість перевищує електричну міцність. Робоча напруга конденсатора має вибиратися з запасом щонайменше 1,5–2 рази від максимальної в колі.

3. З'єднання та енергія

При паралельному з'єднанні ємності додаються, при послідовному додаються обернені величини — протилежно до резисторів. Енергія зарядженого конденсатора пропорційна ємності та квадрату напруги.

Заряджений конденсатор фільтра блока живлення зберігає енергію й після вимкнення. Для конденсатора 470 мкФ при 320 В це близько 24 Дж — цілком достатньо для важкої травми. Перед ремонтом імпульсного блока живлення конденсатори розряджають через резистор і контролюють залишкову напругу вольтметром.

4. Реальний конденсатор

Реальний конденсатор має послідовний еквівалентний опір ESR і паразитну індуктивність. Саме ESR зумовлює нагрівання конденсатора пульсуючим струмом і є головним параметром деградації: з часом електроліт висихає, ESR зростає, пульсації на виході блока живлення збільшуються, апаратура починає давати збої. Ємність при цьому може залишатися майже номінальною — тому несправні конденсатори шукають ESR-метром, а не звичайним вимірювачем ємності.

Паразитна індуктивність виводів обмежує швидкодію, тому розв'язувальні конденсатори ставлять безпосередньо біля виводів живлення мікросхеми з мінімальною довжиною доріжок.

Ключові формули

- Ємність: $C = q/U$; плоского конденсатора: $C = \epsilon\epsilon_0 S/d$
- Паралельно: $C = C_1 + C_2$; послідовно: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$
- Енергія: $W = CU^2/2 = qU/2$
- Стала часу RC-кола: $\tau = RC$

Питання для самоконтролю

1. Конденсатор 470 мкФ заряджено до 320 В. Яка запасена енергія і чим це небезпечно при ремонті?
2. Чому в часозадавальних колах застосовують кераміку NP0, а не X7R?
3. Чому висихання електроліту виявляють за ESR, а не за ємністю?

ЛЕКЦІЯ 11. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ. ЗАКОН ОМА. ОПІР. ЕРС. ЗАКОНИ КІРХГОФА

План лекції

1. Електричний струм. Умови існування. Сила та густина струму.
2. Опір провідника. Питомий опір і його залежність від температури.
3. Закон Ома для ділянки та для повного кола. ЕРС і внутрішній опір.
4. Закони Кірхгофа. Дільник напруги.

1. Струм

Електричний струм — упорядкований рух заряджених частинок. Для його існування потрібні вільні носії заряду та електричне поле в провіднику, тобто джерело ЕРС. Сила струму — заряд, що проходить через переріз за одиницю часу. Густина струму визначає нагрівання й допустиме навантаження провідника.

Для друкованої плати густина струму задає мінімальну ширину доріжки: доріжка з мідної фольги 35 мкм шириною 1 мм витримує приблизно 2–3 А при допустимому перегріві 10 К. Занижена ширина силової доріжки — часта причина її вигорання при перевантаженні.

2. Опір

Опір прямо пропорційний довжині й обернено пропорційний площі перерізу, коефіцієнтом є питомий опір матеріалу. У металів опір зростає з температурою, у напівпровідників — спадає.

Температурна залежність має практичні наслідки: обмотка двигуна, нагрівшись, збільшує опір і зменшує струм; вольфрамова нитка лампи в холодному стані має опір у десять разів менший, через що виникає кидок струму при вмиканні. На цьому ж ефекті працює вимірювання температури обмотки методом опору.

3. Закон Ома і ЕРС

Для ділянки кола струм прямо пропорційний напрузі й обернено пропорційний опору. Для повного кола в знаменнику стоїть сума зовнішнього й внутрішнього опорів джерела.

Внутрішній опір — причина «просідання» напруги під навантаженням. Акумулятор БПЛА з внутрішнім опором 20 мОм при струмі 60 А втрачає всередині 1,2 В і виділяє понад 70 Вт теплоти. Зростання внутрішнього опору з віком батареї — головна причина падіння часу польоту й аварійних посадок під навантаженням, і саме його вимірюють при перевірці акумулятора під навантаженням, а не вольтметром без навантаження.

4. Закони Кірхгофа й дільник напруги

Перший закон: сума струмів, що входять у вузол, дорівнює сумі струмів, що виходять. Другий: у замкненому контурі сума ЕРС дорівнює сумі спадів напруги. Ці два закони дозволяють розрахувати коло будь-якої складності.

Дільник напруги з двох резисторів — базова схема, що постійно зустрічається: у щупі осцилографа, у колі зворотного зв'язку стабілізатора, у вимірюванні напруги батареї мікроконтролером. Його головна властивість — залежність вихідної напруги від струму навантаження, тому дільник розраховують так, щоб струм через нього був на порядок більшим за струм навантаження.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q/t$; закон Ома для ділянки: $I = U/R$
- Опір: $R = \rho l/S$; температурна залежність: $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$
- Закон Ома для повного кола: $I = \varepsilon/(R + r)$
- Закони Кірхгофа: $\sum I = 0$; $\sum \varepsilon = \sum IR$; дільник: $U_{\text{вих}} = U \cdot R_2/(R_1 + R_2)$

Питання для самоконтролю

1. Акумулятор 22,2 В із внутрішнім опором 20 мОм віддає струм 60 А. Яка напруга на клеммах і яка потужність втрачається всередині?
2. Чому справність акумулятора перевіряють під навантаженням, а не вольтметром на холостому ході?
3. Розрахуйте вихідну напругу дільника 10 кОм / 2,2 кОм при вхідних 12 В.

ЛЕКЦІЯ 12. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА. ХІМІЧНІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

План лекції

1. Робота й потужність струму.
2. Закон Джоуля–Ленца. Теплова дія струму в компонентах.
3. Узгодження джерела з навантаженням.
4. Хімічні джерела струму. Літій-полімерні акумулятори та їх експлуатація.

1. Робота й потужність

Робота струму дорівнює добутку напруги, сили струму й часу; потужність — добутку напруги на струм. Для резистивного елемента потужність можна виразити через струм і опір або через напругу й опір.

Розсіювана потужність — головний критерій вибору резистора. Резистор типорозміру 0805 розрахований приблизно на 0,125 Вт; у дільнику на 12 В із резистором 220 Ом розсіюється близько 0,65 Вт, і такий резистор згорить. Перевірка потужності кожного резистора — обов'язковий крок будь-якого розрахунку схеми.

2. Закон Джоуля–Ленца

Кількість теплоти, що виділяється в провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору й часу. Квадратична залежність від струму пояснює, чому перевантаження вдвічі дає вчетверо більше нагрівання, і чому саме струм, а не напруга, є критичним параметром у силових колах.

Той самий закон працює в місці поганого контакту: перехідний опір окисненого роз'єму або холодної пайки створює локальне тепловиділення, контакт нагрівається, окиснення прискорюється, опір зростає ще більше. Цей самопідсилювальний процес завершується обуглюванням роз'єму — типова картина відмови силових з'єднань.

3. Узгодження з навантаженням

Максимальна потужність передається в навантаження, коли його опір дорівнює внутрішньому опору джерела; ККД при цьому становить лише 50 %. Тому режим узгодження застосовують там, де важлива передача сигналу, а не енергії: у антенно-фідерному тракті хвильовий опір 50 Ом узгоджують саме з цієї причини. У силових колах, навпаки, прагнуть, щоб опір навантаження значно перевищував внутрішній, і ККД був високим.

4. Хімічні джерела струму

Гальванічний елемент перетворює енергію хімічної реакції на електричну. Основні параметри — ЕРС, ємність в ампер-годинах, внутрішній опір, допустимий струм розряду (C-rate).

Літій-полімерні збірки БПЛА (наприклад, 6S — шість елементів послідовно, 22,2 В номінально) вимагають балансування: елементи розряджаються нерівномірно, і розряд одного нижче 3,0 В на елемент незворотно його руйнує. Заряд вище 4,2 В або механічне пошкодження призводить до теплового розгону — самопідтримуваної екзотермічної реакції, яку неможливо загасити водою. Звідси правила експлуатації: заряд лише під наглядом і в захисному контейнері, зберігання при напрузі близько 3,8 В на елемент, заборона заряду при від'ємній температурі, утилізація здутих збірок.

Ключові формули

- Робота: $A = UIt$; потужність: $P = UI = I^2R = U^2/R$
- Закон Джоуля–Ленца: $Q = I^2Rt$
- Умова узгодження: $R = r$, при цьому $P_{\max} = \varepsilon^2/(4r)$
- Ємність акумулятора: $W = U \cdot q$ (Вт·год = В · А·год)

Питання для самоконтролю

1. Резистор 220 Ом увімкнено на 12 В. Яка потужність на ньому розсіюється і який типорозмір потрібен?
2. Чому в антенному тракті прагнуть узгодження, а в силовому — ні?
3. Акумулятор 6S 5000 мА·год розряджено струмом 50 А. Який це C-rate і скільки триватиме розряд теоретично?

ЛЕКЦІЯ 13. СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. НАПІВПРОВІДНИКИ Й p-n ПЕРЕХІД

План лекції

1. Струм у металах, рідинах, газах і вакуумі.
2. Власна й домішкова провідність напівпровідників.
3. p-n перехід. Пряме й зворотне вмикання. Діод.
4. Транзисторний ефект. Термо- та фоточутливі елементи.

1. Струм у різних середовищах

У металах носіями є вільні електрони, тому провідність висока, а опір зростає з температурою. У розчинах електролітів струм переносять іони, з чим пов'язана електрохімічна корозія контактів у вологому середовищі: під дією залишкової напруги й вологи мідь мігрує, утворюючи струмопровідні містки між доріжками, — типова причина «дивних» відмов плат після затоплення.

У газах струм виникає при іонізації й має нелінійну вольт-амперну характеристику з ділянкою лавинного пробою — на цьому працюють газорозрядні захисні розрядники в лініях зв'язку. У вакуумі носії одержують термоелектронною емісією; на цьому принципі й досі працюють потужні НВЧ-прилади передавачів.

2. Напівпровідники

Питомий опір напівпровідників займає проміжне положення між провідниками й діелектриками, а з нагріванням він спадає — електрони переходять із валентної зони в зону провідності, утворюючи пару «електрон — дірка». Це власна провідність.

Домішкова провідність створюється легуванням: донорна домішка дає напівпровідник n-типу з надлишком електронів, акцепторна — p-типу з надлишком дірок. Керована зміна типу провідності легуванням і є технологічною основою всієї мікроелектроніки.

3. p-n перехід

На межі областей p- і n-типу утворюється збіднений шар із власним потенціальним бар'єром. При прямому вмиканні бар'єр знижується і струм швидко зростає, починаючи приблизно з 0,3 В для германію, 0,6–0,7 В для кремнію, 2–3 В для світлодіодів. При зворотному — перехід майже не проводить, доки не настане пробій.

Звідси випливають властивості діода, які використовують щодня: випрямлення змінного струму, захист від переполюсування, стабілізація напруги стабілітроном на керованому зворотному пробі, а також перевірка справності діода мультиметром у режимі «прозвонювання переходу» — справний перехід показує близько 0,5–0,7 В в одному напрямку і розрив у зворотному.

Зворотний струм переходу подвоюється приблизно на кожні 10 °C нагрівання; для потужних діодів це може призвести до теплового розгону.

4. Транзистор і чутливі елементи

Два зустрічно ввімкнені переходи дають біполярний транзистор: малий струм бази керує великим струмом колектора. Польовий транзистор керується напругою на затворі через ізолювальний шар — саме ця тонка ізоляція робить його вразливим до ESD.

Терморезистор, фоторезистор, фотодіод і світлодіод — усі базуються на тих самих зонних процесах. Фотодіод перетворює світло на струм (основа приймача оптоволоконної лінії), світлодіод — струм на світло (лекція 20), оптрон об'єднує їх для гальванічної розв'язки кіл.

Ключові формули

- Питомий опір напівпровідника спадає з температурою: $\rho = \rho_0 \cdot \exp(E_g/2kT)$
- Пряме падіння на кремнієвому переході: $U \approx 0,6 \dots 0,7 \text{ В}$
- Струм діода: $I = I_0 [\exp(qU/kT) - 1]$
- Коефіцієнт підсилення транзистора: $\beta = I_k/I_b$

Питання для самоконтролю

1. Як за допомогою мультиметра відрізнити справний кремнієвий діод від пробитого і від обірваного?
2. Чому польовий транзистор із ізолюваним затвором особливо чутливий до електростатичного розряду?
3. Чому опір напівпровідника з нагріванням спадає, а металу — зростає?

ЛЕКЦІЯ 14. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. СИЛА АМПЕРА І СИЛА ЛОРЕНЦА. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

План лекції

1. Магнітне поле струму. Індукція магнітного поля.
2. Сила Ампера. Взаємодія провідників зі струмом. Електродвигун.
3. Сила Лоренца. Ефект Холла.
4. Магнітні властивості речовини. Ферити й магнітне екранування.

1. Магнітне поле струму

Магнітне поле створюється рухомими зарядами й діє на рухомі заряди. Його силова характеристика — магнітна індукція, вимірюється в теслах. Поле прямого провідника має вигляд концентричних кіл, поле котушки (соленоїда) всередині близьке до однорідного й пропорційне числу витків на одиницю довжини та силі струму.

2. Сила Ампера й двигун

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера, пропорційна індукції, силі струму й довжині провідника. Паралельні провідники зі співнапрямленими струмами притягуються, з протилежними — відштовхуються. Саме тому шини силового кола при короткому замиканні механічно вигинаються.

Дія сили Ампера на рамку зі струмом створює обертальний момент — це принцип будь-якого електродвигуна, зокрема безколекторного двигуна БПЛА, де обмотки статора комутуються електронним регулятором, а ротор несе постійні магніти. Кількість пар полюсів визначає зв'язок частоти комутації з частотою обертання, що враховується при налаштуванні регулятора.

3. Сила Лоренца й ефект Холла

На окремий рухомий заряд у магнітному полі діє сила Лоренца, перпендикулярна і до швидкості, і до поля; вона не виконує роботи, а лише викривляє траєкторію. У пластині зі струмом, вміщеній у магнітне поле, ця сила розділяє заряди й створює поперечну різницю потенціалів — ефект Холла.

На ньому працюють датчики положення ротора безколекторного двигуна, безконтактні струмовимірювальні кліщі постійного струму й датчики положення в антенних поворотних пристроях. Головна перевага — вимірювання струму без розриву кола.

4. Магнітні матеріали

Діамагнетики трохи послаблюють поле, парамагнетики трохи посилюють, феромагнетики (залізо, нікель, кобальт, ферити) посилюють його в сотні та тисячі разів завдяки доменній структурі. Вище точки Кюрі феромагнетизм зникає.

Ферит — це феромагнітна кераміка з високим питомим опором, і саме тому його застосовують на високих частотах: у ньому майже не течуть вихрові струми. Феритове кільце на кабелі живлення пригнічує синфазні завади, феритове осердя дроселя збільшує індуктивність у десятки разів. Важливо, що осердя має ефект насичення: при перевищенні певного струму індуктивність різко падає, дросель перестає виконувати свою функцію, і імпульсний перетворювач іде в аварійний режим.

Магнітне екранування, на відміну від електростатичного, потребує не провідного, а магнітом'якого матеріалу: постійне магнітне поле мідним екраном не зупинити.

Ключові формули

- Індукція поля соленоїда: $B = \mu_0 n I$
- Сила Ампера: $F = B I l \cdot \sin \alpha$
- Сила Лоренца: $F = q v B \cdot \sin \alpha$
- Магнітний потік: $\Phi = B S \cdot \cos \alpha$

Питання для самоконтролю

1. Чому феритове осердя застосовують на високих частотах, а шихтовану сталь — на низьких?
2. Що відбувається з дроселем при насиченні осердя і як це проявляється в роботі імпульсного перетворювача?
3. Чому мідний екран захищає від електричного поля, але не від постійного магнітного?

ЛЕКЦІЯ 15. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. САМОІНДУКЦІЯ. ТРАНСФОРМАТОР

План лекції

1. Явище електромагнітної індукції. Закон Фарадея. Правило Ленца.
2. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля.
3. Вихрові струми.
4. Трансформатор і імпульсний перетворювач.

1. Закон Фарадея

При зміні магнітного потоку через контур у ньому виникає ЕРС індукції, пропорційна швидкості зміни потоку. Правило Ленца визначає напрям індукційного струму: він завжди протидіє причині, що його спричинила, — це прямий наслідок закону збереження енергії. Індукція є фізичною основою не лише генераторів, а й наведення завад: будь-яка петля провідників у схемі є витком, у якому змінне поле наводить ЕРС. Звідси правило розведення

плати — мінімізувати площу контуру між прямим і зворотним провідником, тобто прокладати сигнальну доріжку над суцільним «земляним» полігоном.

2. Самоіндукція й індуктивність

Зміна струму в котушці змінює її власний потік і наводить ЕРС самоіндукції. Індуктивність вимірюється в генрі й залежить від квадрата числа витків, геометрії та магнітної проникності осердя. Енергія магнітного поля котушки пропорційна індуктивності й квадрату струму.

Найважливіший практичний наслідок: струм у котушці не може змінитися стрибком. При розмиканні кола з індуктивністю (обмотка реле, двигун, дросель) на контактах виникає викид напруги в сотні вольт, який пропалює контакти й пробиває транзистор ключа. Тому паралельно обмотці ставлять зворотний («гасильний») діод, а в колах змінного струму — RC-ланцюг.

3. Вихрові струми

У суцільному провіднику змінне поле наводить замкнені вихрові струми (струми Фуко), що нагрівають матеріал. У трансформаторі це втрати, тому осердя набирають із тонких ізольованих пластин; у індукційній печі та в безконтактному нагріві це корисний ефект.

Вихрові струми пояснюють і роботу металопрошукача, і загасання коливань стрілкового приладу, і нагрівання екрана, розташованого надто близько до котушки потужного дроселя.

4. Трансформатор

Трансформатор передає енергію змінного струму з однієї обмотки в іншу через магнітний потік; відношення напруг дорівнює відношенню чисел витків, а потужність (за винятком втрат) зберігається, тому струми змінюються обернено.

В апаратурі зв'язку трансформатор виконує три функції: зміну напруги, гальванічну розв'язку та узгодження опорів. Сучасні блоки живлення будуються за імпульсною схемою: напруга спочатку випрямляється, потім перетворюється на змінну частотою десятки-сотні кілогерців, і лише тоді подається на трансформатор. Оскільки потрібний переріз осердя обернено пропорційний частоті, високочастотний трансформатор у сотні разів менший за мережевий тієї ж потужності — це і є фізична причина компактності сучасних блоків живлення.

Ключові формули

- Закон Фарадея: $\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$; для N витків: $\varepsilon = -N \cdot \Delta\Phi/\Delta t$
- ЕРС самоіндукції: $\varepsilon = -L \cdot \Delta I/\Delta t$
- Енергія магнітного поля: $W = LI^2/2$
- Трансформатор: $U_1/U_2 = N_1/N_2 = I_2/I_1$

Питання для самоконтролю

1. Чому паралельно обмотці реле обов'язково ставлять зворотний діод?
2. Чому імпульсний блок живлення на 100 кГц значно менший за мережевий трансформаторний тієї самої потужності?
3. Як зменшити наведення завад на сигнальну доріжку при розведенні плати й чому це працює?

ЛЕКЦІЯ 16. ЗМІННИЙ СТРУМ. RLC-КОЛО. РЕАКТИВНИЙ ОПІР І РЕЗОНАНС

План лекції

1. Змінний струм. Період, частота, амплітудне й діюче значення.
2. Опір конденсатора та котушки в колі змінного струму. Зсув фаз.
3. Повний опір RLC-кола. Резонанс напруг і струмів.
4. Потужність у колі змінного струму. Скін-ефект і втрати у фідері.

1. Змінний струм

Змінний струм змінюється за гармонічним законом; його характеризують амплітудою, періодом, частотою й початковою фазою. Діюче (середньоквадратичне) значення менше за амплітудне в корені з двох разів, і саме його показує більшість мультиметрів.

Тут криється поширена помилка вимірювання: звичайний мультиметр вимірює середньовипрямлене значення й лише перераховує його в діюче, припускаючи чисту синусоїду. На виході імпульсного перетворювача чи регулятора обертів форма далека від синусоїди, і покази будуть хибними — потрібен прилад із функцією True RMS.

2. Реактивні опори

Ємнісний опір обернено пропорційний частоті й ємності: конденсатор пропускає високі частоти й не пропускає постійний струм. Індуктивний опір прямо пропорційний частоті й індуктивності: котушка пропускає постійний струм і чинить опір високочастотному.

Ці дві протилежні залежності — основа всієї фільтрації. Розв'язувальний конденсатор шунтує завади на «землю», дросель у колі живлення їх не пропускає, а разом вони утворюють LC-фільтр. У конденсаторі струм випереджає напругу на чверть періоду, у котушці — відстає; саме цей зсув фаз і дозволяє будувати частотно-вибіркові кола.

3. Резонанс

У послідовному RLC-колі при рівності ємнісного та індуктивного опорів настає резонанс напруг: повний опір мінімальний, струм максимальний, а напруги на котушці та конденсаторі можуть у багато разів перевищувати вхідну. У паралельному контурі — резонанс струмів: опір контуру максимальний.

Резонансна частота визначається добутком індуктивності й ємності. Коливальний контур є основою селекції сигналів у радіоприймачі: змінюючи ємність варикапа, змінюють резонансну частоту й обирають потрібну станцію. Добротність контуру визначає смугу пропускання: висока добротність дає вузьку смугу й краще відстроювання від сусіднього каналу.

4. Потужність і скін-ефект

У колі змінного струму розрізняють активну, реактивну й повну потужність; їх відношення характеризує коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Реактивна потужність не виконує корисної роботи, але завантажує проводи й джерело.

З ростом частоти струм витісняється до поверхні провідника — скін-ефект. На частоті 1 МГц глибина проникнення в мідь становить близько 66 мкм, на 1 ГГц — близько 2 мкм. Тому високочастотні провідники сріблять (струм тече саме по поверхні), товстий центральний провідник коаксіального кабелю не дає виразу пропорційно перерізу, а загасання фідера зростає з частотою. Для багатожильних котушок застосовують літцендрат.

Ключові формули

- Діюче значення: $I = I_{\max}/\sqrt{2}$; $U = U_{\max}/\sqrt{2}$
- Реактивні опори: $X_C = 1/(2\pi fC)$; $X_L = 2\pi fL$
- Повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
- Резонансна частота: $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$; потужність: $P = UI \cdot \cos \varphi$

Питання для самоконтролю

1. Контур має $L = 100$ мкГн і $C = 100$ пФ. Яка його резонансна частота?
2. Чому звичайний мультиметр дає хибні покази при вимірюванні напруги на виході регулятора обертів?
3. Чому загасання коаксіального фідера зростає з частотою і як із цим борються конструктивно? # МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ ТА ОПТИКА

3 лекції, 6 годин

ЛЕКЦІЯ 17. МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС. КВАРЦОВИЙ РЕЗОНАТОР

План лекції

1. Гармонічні коливання. Амплітуда, період, частота, фаза.
2. Вільні та затухаючі коливання. Добротність.
3. Вимушені коливання й резонанс.
4. Коливальний контур і кварцовий резонатор. Стабільність частоти.

1. Гармонічні коливання

Коливання — процес, що повторюється в часі. Гармонічним називають коливання, яке описується синусоїдою; його параметри — амплітуда, період, частота, циклічна частота й початкова фаза. Математичний маятник і пружинний маятник дають дві базові моделі, які повністю переносяться на електричний коливальний контур: маса відповідає індуктивності, жорсткість — оберненій ємності, координата — заряду, швидкість — струму.

Ця аналогія не формальна: одні й ті самі рівняння описують механічну вібрацію конструкції БПЛА і коливання в контурі гетеродина, тому й методи боротьби з ними спільні — зміна власної частоти або введення загасання.

2. Затухання й добротність

У реальній системі енергія втрачається: у механічній — на тертя, в електричній — на активному опорі. Амплітуда спадає за експонентою. Добротність показує, у скільки разів запасена енергія перевищує втрати за період; чим вона вища, тим повільніше затухають коливання й тим вужча смуга пропускання контуру.

Добротність контуру з повітряним діелектриком і товстим посрібленим проводом сягає сотень, кварцового резонатора — десятків і сотень тисяч. Саме тому селективність приймача визначає добротність, а стабільність частоти — кварц.

3. Резонанс

При збіганні частоти зовнішньої дії з власною частотою системи амплітуда різко зростає — це резонанс. У радіотехніці він корисний: контур виділяє потрібний сигнал із суміші. У механіці частіше шкідливий: резонанс рами БПЛА з частотою обертання гвинтів руйнує кріплення та створює хибні покази гіроскопа, через що польотний контролер починає «розгойдувати» апарат. Боротьба стандартна — зміна жорсткості рами, балансування гвинтів, демпфувальний підвіс і програмна фільтрація.

4. Кварцовий резонатор

Кварцова пластина завдяки п'єзоефекту перетворює механічні коливання на електричні й навпаки, поводячись у схемі як контур із надзвичайно високою добротністю. Стабільність частоти кварцу становить одиниці мільйонних часток, тоді як LC-контур — сотні.

Звідси його роль: тактування мікроконтролерів, формування опорної частоти трансивера, лічба часу. Температурний дрейф кварцу компенсують термостатуванням або схемною компенсацією; у системах зв'язку та радіонавігації саме стабільність опорної частоти визначає, чи зможе приймач узагалі захопити сигнал.

Ключові формули

- Гармонічне коливання: $x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$; $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$
- Пружинний маятник: $T = 2\pi\sqrt{m/k}$; математичний: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$
- Коливальний контур (формула Томсона): $T = 2\pi\sqrt{LC}$
- Добротність: $Q = f_0/\Delta f = \rho/R$, де $\rho = \sqrt{L/C}$

Питання для самоконтролю

1. Контур має добротність 50 і резонансну частоту 10 МГц. Яка смуга пропускання?
2. Чому кварцовий резонатор забезпечує значно вищу стабільність частоти, ніж LC-контур?
3. Як проявляється механічний резонанс рами БПЛА і якими способами його усувають?

ЛЕКЦІЯ 18. ХВИЛІ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. АНТЕНА Й ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛІ

План лекції

1. Хвильовий процес. Довжина хвилі, швидкість, частота.
2. Електромагнітна хвиля. Шкала електромагнітних хвиль.
3. Випромінювання й антена. Поляризація. Діаграма спрямованості.
4. Поширення радіохвиль. Загасання, відбивання, завади.

1. Хвиля

Хвиля — поширення коливань у просторі з перенесенням енергії без перенесення речовини. Довжина хвилі дорівнює добутку швидкості на період. Поздовжні хвилі (звук у повітрі) й поперечні (хвилі у струні, електромагнітні хвилі) відрізняються напрямом коливань відносно напрямку поширення.

2. Електромагнітна хвиля

Змінне електричне поле породжує магнітне, а змінне магнітне — електричне; так утворюється електромагнітна хвиля, що поширюється у вакуумі зі швидкістю світла. Вектори електричного й магнітного полів взаємно перпендикулярні й перпендикулярні до напрямку поширення.

Шкала електромагнітних хвиль неперервна: радіохвилі, мікрохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське й гамма-випромінювання. Уся різниця між ними — у частоті, а отже, в енергії кванта; фізична природа одна.

У середовищі з діелектричною проникністю швидкість менша, тому в коаксіальному кабелі сигнал іде повільніше за світло — коефіцієнт укорочення становить 0,66–0,8. Це враховують при виготовленні чвертьхвильових відрізків і при вимірюванні відстані до пошкодження кабелю рефлектометром.

3. Антена

Антенa — пристрій, що перетворює струм високої частоти на електромагнітну хвилю й навпаки. Її розміри визначаються довжиною хвилі: класичний півхвильовий вібратор має довжину близько половини хвилі, чвертьхвильовий штир — чверті. Саме тому антенa для 27 МГц має метри, а для 2,4 ГГц — сантиметри.

Поляризація хвилі задається орієнтацією електричного вектора. Неузгодженість поляризацій передавальної та приймальної антен (наприклад, вертикальна проти горизонтальної) вносить втрати в десятки децибел — типова причина «поганого зв'язку» при правильно налаштованій апаратурі.

Діаграма спрямованості описує розподіл випроміненої потужності за напрямками; коефіцієнт підсилення антени — це не підсилення потужності, а її перерозподіл у потрібний сектор. Узгодження антени з фідером контролюють за коефіцієнтом стійної хвилі: при поганому узгодженні частина потужності відбивається назад і може пошкодити вихідний каскад передавача.

4. Поширення й завади

Потужність сигналу у вільному просторі спадає обернено пропорційно квадрату відстані, а в реальних умовах ще й через поглинання, відбивання від будівель і багатопроменевість. Довгі хвилі огинають перешкоди краще за короткі; сантиметрові вимагають прямої видимості й помітно поглинаються дощем і листям.

Ці закономірності лежать в основі і планування радіомереж, і радіоелектронної боротьби: постановка завади зводиться до створення в смузі приймача сигналу з потужністю, достатньою для перевищення корисного, а захист — до звуження смуги, спрямованих антен і зміни частоти.

Ключові формули

- Довжина хвилі: $\lambda = v/f = vT$; у вакуумі $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с
- Швидкість у середовищі: $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$; коефіцієнт укорочення $k = v/c$
- Півхвильовий вібратор: $l \approx 0,95 \cdot \lambda/2$; чвертьхвильовий штир: $l \approx \lambda/4$
- Спадання потужності: $P \sim 1/r^2$

Питання для самоконтролю

1. Яка довжина хвилі відповідає частоті 2,4 ГГц і якою буде довжина чвертьхвильового штиря?
2. Чому неузгодженість поляризацій антен різко погіршує зв'язок?
3. Що показує коефіцієнт стійної хвилі й чим небезпечне його високе значення для передавача?

ЛЕКЦІЯ 19. ОПТИКА. ПОВНЕ ВНУТРІШНЄ ВІДБИВАННЯ Й ОПТОВОЛОКНО. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

План лекції

1. Закони відбивання й заломлення. Абсолютний і відносний показник заломлення.
2. Повне внутрішнє відбивання. Оптичне волокно й бюджет втрат лінії.
3. Інтерференція, дифракція, дисперсія.
4. Теплове випромінювання. Пірометрія й тепловізійна діагностика.

1. Відбивання й заломлення

Кут відбивання дорівнює куту падіння. При переході в інше середовище промінь заломлюється, і відношення синусів кутів дорівнює відношенню показників заломлення. Показник заломлення показує, у скільки разів швидкість світла в середовищі менша, ніж у вакуумі.

2. Повне внутрішнє відбивання й оптоволокно

Якщо світло йде з оптично густішого середовища в менш густе під кутом, більшим за граничний, воно повністю відбивається назад. Це і є фізичний принцип оптичного волокна: серцевина має трохи більший показник заломлення, ніж оболонка, і промінь, потрапивши в конус прийому, поширюється, багаторазово відбиваючись від межі.

Числова апертура визначає максимальний кут введення світла. Одномодове волокно з серцевиною близько 9 мкм передає одну моду й дає мінімальну дисперсію, тому застосовується на магістралях; багатомодове з серцевиною 50–62,5 мкм простіше в монтажі, але через міжмодову дисперсію обмежене за відстанню й швидкістю.

Бюджет втрат лінії складається з погонного загасання волокна (близько 0,35 дБ/км на 1310 нм і 0,22 дБ/км на 1550 нм), втрат на зварних стиках (соті частки децибела) і на роз'ємах (десяті частки). Забруднений або подряпаний торець конектора — найчастіша причина зростання втрат; саме тому перед з'єднанням торець чистять і контролюють мікроскопом, а несправність локалізують оптичним рефлектометром.

3. Інтерференція, дифракція, дисперсія

Інтерференція — накладання когерентних хвиль із утворенням стійкої картини підсилення й послаблення. На ній ґрунтуються просвітлювальні покриття оптики та інтерференційні фільтри. Дифракція — огинання хвилею перешкод, помітне, коли розміри перешкоди сумірні з довжиною хвилі; вона обмежує роздільну здатність будь-якої оптичної системи й пояснює проникнення радіохвиль у «тінь» перешкоди.

Дисперсія — залежність показника заломлення від довжини хвилі. У волоконній лінії хроматична дисперсія розмиває імпульс і обмежує швидкість передавання на великій довжині.

4. Теплове випромінювання й діагностика

Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює електромагнітні хвилі. Потужність випромінювання пропорційна четвертому степеню абсолютної температури (закон Стефана–Больцмана), а довжина хвилі максимуму обернено пропорційна температурі (закон зміщення Віна). За кімнатної температури максимум припадає на інфрачервону область близько 10 мкм.

Саме на цьому працює тепловізор — основний інструмент безрозбірної діагностики: перегрітий силовий ключ, поганий контакт у клемнику, перевантажений трансформатор виявляються на термограмі за хвилини. Головна умова коректного вимірювання — урахування коефіцієнта випромінювання поверхні: полірований метал має його низьким і на термограмі виглядає холоднішим, ніж є насправді, тому контрольні ділянки матують або наклеюють на них еталонну стрічку.

Ключові формули

- Закон заломлення: $\sin \alpha / \sin \beta = n_2/n_1$; $n = c/v$
- Граничний кут: $\sin \alpha_{\text{гр}} = n_2/n_1$; числова апертура: $NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$
- Загасання в дБ: $A = 10 \cdot \lg(P_1/P_2)$

– Закон Стефана–Больцмана: $P = \epsilon \sigma T^4 S$; закон Віна: $\lambda_{\max} \cdot T = b$

Питання для самоконтролю

1. Лінія завдовжки 40 км має погонне загасання 0,22 дБ/км, два роз'єми по 0,3 дБ і чотири зварювання по 0,05 дБ. Який загальний бюджет втрат?
2. Чому одномодове волокно застосовують на магістралях, а багатомодове — всередині будівлі?
3. Чому полірована шина на термограмі здається холоднішою, ніж є насправді?

МОДУЛЬ V. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 20. КВАНТОВА ФІЗИКА. ФОТОЕФЕКТ. БУДОВА АТОМА. ЕНЕРГЕТИЧНІ ЗОНИ

План лекції

1. Квантова гіпотеза. Фотон і його енергія.
2. Фотоефект і його закони. Фотодіод, фототранзистор, ПЗЗ-матриця.
3. Будова атома. Постулати Бора. Спектри.
4. Енергетичні зони твердого тіла. Світлодіод і лазер.

1. Квант і фотон

Випромінювання й поглинання енергії відбувається порціями — квантами. Енергія фотона пропорційна частоті; коефіцієнтом є стала Планка. Звідси видиме світло має енергію кванта близько 2–3 еВ, інфрачервоне — менше, рентгенівське — тисячі електронвольт. Саме енергія кванта, а не інтенсивність, визначає, чи здатне випромінювання вирвати електрон або зруйнувати зв'язок у молекулі.

2. Фотоефект

Зовнішній фотоефект — вибивання електронів світлом із поверхні металу; він має червону межу: якщо енергія кванта менша за роботу виходу, ефект не виникає за будь-якої інтенсивності. Внутрішній фотоефект — переведення електронів у зону провідності всередині напівпровідника, тобто зміна його провідності під дією світла.

Практично вся фотоелектроніка спирається на внутрішній фотоефект: фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, оптрон, ПЗЗ- і КМОН-матриці камер БПЛА, фотоприймач волоконно-оптичної лінії, сонячна батарея. Чутливість фотоприймача завжди має спектральний максимум — саме тому приймач ВОЛЗ узгоджують із довжиною хвилі передавача (850, 1310 або 1550 нм).

3. Атом і спектри

За планетарною моделлю й постулатами Бора електрон може перебувати лише на дозволених орбітах із певною енергією; випромінювання відбувається при переході з вищого рівня на нижчий, і енергія фотона дорівнює різниці рівнів. Тому спектр випромінювання розрідженого газу лінійчастий і унікальний для кожного елемента — на цьому базується спектральний аналіз.

4. Зони, світлодіод і лазер

У твердому тілі рівні розщеплюються в зони. Ширина забороненої зони визначає властивості матеріалу: у діелектрика вона велика, у напівпровідника — порядку електронвольта, у провідника зони перекриваються.

При рекомбінації електрона й дірки в р-n переході виділяється квант з енергією, близькою до ширини забороненої зони. Звідси прямий зв'язок: чим ширша заборонена зона матеріалу, тим коротша довжина хвилі й тим більше пряме падіння напруги на світлодіоді — інфрачервоний світиться при 1,2–1,5 В, синій і білий потребують близько 3 В. Це не «особливість виробника», а фізика матеріалу.

Лазер працює на вимушеному випромінюванні в середовищі з інверсною заселеністю рівнів і дає когерентне монохроматичне спрямоване світло. У техніці зв'язку лазерний діод є

джерелом для одномодових волоконних ліній, у виробництві — інструментом різання й маркування. Через високу густину потужності навіть невидиме інфрачервоне випромінювання лазера ВОЛЗ небезпечно для очей, тому дивитися в торець підключеного волокна категорично заборонено, а перевірку виконують детектором випромінювання.

Ключові формули

- Енергія фотона: $E = h\nu = hc/\lambda$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
- Рівняння Ейнштейна для фотоефекту: $h\nu = A_{\text{вих}} + mv^2/2$
- Червона межа: $\nu_{\text{min}} = A_{\text{вих}}/h$
- Енергія переходу: $h\nu = E_2 - E_1$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Питання для самоконтролю

1. Обчисліть енергію фотона з довжиною хвилі 1550 нм в електронвольтах.
2. Чому пряме падіння напруги на синьому світлодіоді більше, ніж на червоному?
3. Чому заборонено дивитися в торець підключеного оптичного волокна, якщо випромінювання невидиме?

ЛЕКЦІЯ 21. БУДОВА ЯДРА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ДОЗИ Й ЗАХИСТ. РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОНІКИ

План лекції

1. Склад ядра. Енергія зв'язку. Ядерні реакції.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
3. Дози опромінення, прилади контролю й засоби захисту.
4. Вплив іонізуючого випромінювання на електронні компоненти. Сучасна фізична картина світу.

1. Ядро та енергія зв'язку

Ядро складається з протонів і нейтронів, які утримуються ядерними силами — найінтенсивнішими з відомих, але короткодійними. Маса ядра менша за суму мас нуклонів; дефект маси відповідає енергії зв'язку згідно зі співвідношенням Ейнштейна. Максимальна питома енергія зв'язку припадає на залізо, тому енергія виділяється і при поділі важких ядер, і при синтезі легких.

2. Радіоактивність

Радіоактивний розпад — самочинне перетворення нестійких ядер із випромінюванням альфа-частинок, бета-частинок або гамма-квантів. Процес статистичний: передбачити момент розпаду окремого ядра неможливо, але для великої кількості ядер справджується експоненціальний закон із періодом піврозпаду.

Проникна здатність різна: альфа-частинки затримуються аркушем паперу, бета — алюмінієвою пластиною в кілька міліметрів, гамма-кванти потребують свинцю або бетону. Звідси й різна небезпека: альфа-випромінювачі небезпечні при потраплянні всередину організму, гамма — і ззовні.

3. Дози й захист

Поглинена доза вимірюється в греях, еквівалентна — у зівертах з урахуванням коефіцієнта якості випромінювання. Природний фон становить приблизно 2–3 мЗв на рік. Контроль здійснюють дозиметрами й радіометрами; побутові прилади зазвичай побудовані на лічильнику Гейгера–Мюллера, робота якого ґрунтується на іонізації газу — тобто на матеріалі лекції 13.

Три базові принципи захисту: час, відстань і екран. Доза пропорційна часу перебування, спадає обернено пропорційно квадрату відстані від точкового джерела й послаблюється екраном за експонентою.

4. Радіація і електроніка

Іонізуюче випромінювання діє на напівпровідникові прилади двома шляхами. Накопичена доза створює заряд у підзатворному діелектрику, змінює порогові напруги й поступово виводить мікросхему з ладу. Одиночна важка частинка може спричинити збій окремої комірки пам'яті або навіть тиристорний ефект із виходом мікросхеми з ладу. Саме тому

апаратура для космосу й для роботи в зонах підвищеного фону виготовляється за спеціальними радіаційно стійкими технологіями, а звичайна комерційна електроніка для таких умов не придатна.

У практиці технічного обслуговування іонізуюче випромінювання зустрічається і з корисного боку: рентгенівський контроль плат дозволяє побачити паяні з'єднання під корпусами BGA, які принципово недоступні візуальному огляду.

5. Сучасна фізична картина світу

Курс завершується узагальненням: класична механіка, термодинаміка, електродинаміка, квантова і ядерна фізика не заперечують одна одну, а мають різні межі застосовності. Класична механіка є граничним випадком релятивістської при малих швидкостях і квантової — при великих масштабах. Уміння свідомо обирати рівень опису явища й перевіряти результат за законом збереження енергії — головний практичний підсумок вивчення фізики для майбутнього фахівця з електроніки.

Ключові формули

- Дефект маси й енергія зв'язку: $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot c^2$
- Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-(t/T_{1/2})}$
- Активність: $A = \lambda N$, [Бк]
- Еквівалентна доза: $H = D \cdot k$, [Зв]; послаблення відстанню: $D \sim 1/r^2$

Питання для самоконтролю

1. Початкова кількість ядер $8 \cdot 10^{20}$, період піврозпаду 5 діб. Скільки ядер залишиться через 15 діб?
2. Якими двома механізмами іонізуюче випромінювання виводить із ладу мікросхему?
3. Як зміниться доза від точкового джерела, якщо відстань до нього збільшити втричі?

ДОДАТОК. ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ КУРСУ

№	Тема практичного заняття	Модуль	Год.
1	Обробка результатів вимірювань: похибки, клас точності приладу, запис результату	I	2
2	Кінематика й динаміка: перевантаження блоків апаратури, тяга гвинта БПЛА	I	2
3	Робота, потужність, ККД силової установки	I	2
4	Рівняння стану газу. Герметичні корпуси, точка роси, конденсат	II	2
5	Тепловий баланс компонента. Теплова стала часу	II	2
6	Розрахунок теплового опору ланцюга й вибір радіатора	II	2
7	Електричне поле: напруженість, потенціал, оцінювання ESD-небезпеки	III	2
8	Конденсатори: ємність, з'єднання, енергія, стала часу RC	III	2
9	Закони Ома і Кірхгофа. Дільник напруги. Коло з ЕРС і внутрішнім опором	III	2
10	Потужність і закон Джоуля–Ленца. Вибір резистора. Розрахунок акумуляторної збірки	III	2
11	Магнітне поле й електромагнітна індукція. Розрахунок трансформатора та дроселя	III	2
12	Коливальний контур: резонансна частота, добротність, смуга пропускання	IV	2
13	Електромагнітні хвилі: довжина хвилі, розміри антени, загасання тракту	IV	2
14	Оптика: числова апертура, бюджет втрат волоконно-оптичної лінії	IV	2
15	Фотоефект і радіоактивний розпад. Підсумкове узагальнювальне заняття	V	2
	РАЗОМ		30

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

Основні

1. Гельфгат І. М. Фізика: підручник для 10 (11) класу закладів загальної середньої освіти (рівень стандарту). — Харків: Ранок. (Електронна бібліотека ІМЗО)
2. Засекіна Т. М., Засекін Д. О. Фізика (профільний рівень): підручник для закладів загальної середньої освіти. — Київ: Оріон. (Електронна бібліотека ІМЗО)
3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т. Загальний курс фізики: у 3 т. — Київ: Техніка.
4. Душенко В. П., Кучерук І. М. Загальна фізика: фізичні основи механіки, молекулярна фізика і термодинаміка. — Київ: Вища школа.

Додаткові та фахово орієнтовані

5. Бойко В. І. та ін. Схемотехніка електронних систем: підручник. — Київ: Вища школа.
6. Основи телекомунікацій та електронних комунікаційних мереж: навчальний посібник для закладів фахової передвищої освіти.
7. ДСТУ ІЕС 60825-1. Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги.
8. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Інформаційні ресурси

9. Електронна бібліотека Інституту модернізації змісту освіти: lib.imzo.gov.ua
10. Освітня платформа «На Урок» / «Всеосвіта» — інтерактивні симуляції з фізики.
11. PhET Interactive Simulations (University of Colorado) — симуляції з електрики, оптики, хвиль (українська локалізація).