

Заступник директора з НР ЗНП О «ДПТК»
Сергій ПОРДІЄНО
«28» серпня 2026 р.



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

21 лекція, 42 години. П'ять змістових модулів

Дисципліна: Фізика (ОК7)

Галузь знань: J — Транспорт та послуги

Спеціальність: J8 — Автомобільний транспорт

Освітньо-професійна програма: «Обслуговування та ремонт автомобілів і двигунів»

Освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

Обсяг: 4 кредити ЄКТС, 120 год (лекції — 42, практичні — 30, самостійна робота — 48), I курс, 1 семестр

Форма підсумкового контролю: диференційований залік

Розробник: Дзюбанов Володимир Андрійович, викладач фізики ЗПО «ДПТК»,

Контакти: vladimir.dzyubanov@gmail.com, +380 63 870 02 88

Дніпро — 2026

ПЕРЕДМОВА

Конспект розроблено як основне навчальне джерело з дисципліни «Фізика» для здобувачів спеціальності J8 — Автомобільний транспорт відповідно до розділу 8 освітньо-професійної програми «Обслуговування та ремонт автомобілів і двигунів», який передбачає використання власних навчально-методичних розробок педагогічних працівників.

Його призначення — не переказати підручник загальної фізики, а відібрати з нього те, що безпосередньо працює під час експлуатації, технічного обслуговування, діагностики й ремонту автомобілів і двигунів, і подати у зв'язці з обладнанням, з яким ви матимете справу: двигуном, трансмісією, підвіскою, гальмівною системою, акумуляторною батареєю, генератором, стартером, системою запалювання, датчиками та діагностичними приладами.

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.

Розподіл годин ураховує особливість навчального плану 120 кредитів ЄКТС: окремої дисципліни «Електротехніка та електроніка» в ньому немає, тому модуль III «Електрика і магнетизм» розширено й орієнтовано на електрообладнання автомобіля. Механіка також має збільшений обсяг, оскільки на ній ґрунтуються тягово-швидкісні, гальмівні властивості та стійкість автомобіля.

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.

Теми, дотичні до чутливого досвіду (дорожньо-транспортні пригоди, іонізуюче випромінювання), подано в технічному ключі; під час їх обговорення діє правило «стоп-слова», визначене робочою програмою.

Розподіл матеріалу за модулями:

№	Модуль	Лекції, год	Практ., год	СР, год	Годин
I	Механіка та основи гідростатики	12	8	14	34
II	Молекулярна фізика і термодинаміка	10	6	10	26
III	Електрика і магнетизм	12	8	14	34
IV	Колівання, хвилі та оптика	4	4	5	13
V	Атомна та ядерна фізика	4	4	5	13
	РАЗОМ	42	30	48	120

Модульний контроль № 1 охоплює модулі I–II (лекції 1–11), модульний контроль № 2 — модулі III–V (лекції 12–21).

МОДУЛЬ I. МЕХАНІКА ТА ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ

6 лекцій, 12 годин

ЛЕКЦІЯ 1

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

План лекції

1. Предмет і методи фізики. Явище, модель, закон, теорія.
2. Фізичні величини. Міжнародна система одиниць СІ.
3. Прямі та непрямі вимірювання.
4. Похибки вимірювань і правила запису результату.

1. Предмет фізики та її місце в підготовці фахівця з автомобільного транспорту

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

Кожна фізична модель має межі застосовності. Модель абсолютно твердого тіла зручна для розрахунку важеля домкрата, але непридатна для розрахунку ресори: там уся суть саме в деформації. Модель ідеального газу добре описує повітря в шині, але не описує паливо в паровій фазі поблизу точки кипіння. Фахівець відрізняється від дилетанта тим, що знає межі моделі, якою користується.

Автомобіль — це машина для перетворення енергії. Хімічна енергія палива в циліндрі переходить у внутрішню енергію газів, далі в механічну роботу поршня, крутний момент колінчастого вала, силу тяги на колесах і кінетичну енергію автомобіля. Під час гальмування кінетична енергія перетворюється на теплоту в гальмівних механізмах. Паралельно працює електрична частина: генератор перетворює механічну енергію на електричну, акумулятор накопичує її у хімічній формі, стартер повертає в механічну. На кожному переході діють фізичні закони, які не можна обійти. Слюсар, який знає лише послідовність операцій, здатний замінити деталь; фахівець, який розуміє фізику, здатний пояснити, чому деталь вийшла з ладу.

2. Фізичні величини та система СІ

Фізична величина — властивість, яку можна виміряти, тобто кількісно порівняти з еталоном. Скалярні величини повністю задані числом (маса, температура, енергія, об'єм), векторні потребують ще й напрямку (сила, швидкість, прискорення, момент сили).

Міжнародна система одиниць СІ побудована на семи основних одиницях: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль, кандела. Решта одиниць похідні: ньютон ($\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$), паскаль ($\text{Н}/\text{м}^2$), джоуль ($\text{Н} \cdot \text{м}$), ват ($\text{Дж}/\text{с}$), вольт, ом.

В автомобільній техніці поширені позасистемні одиниці: тиск у шинах указують у барах або атмосферах ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$), потужність двигуна — у кінських силах ($1 \text{ к.с.} = 735,5 \text{ Вт}$), витрату палива — у літрах на 100 км, швидкість — у кілометрах за годину. У зарубіжній документації трапляються psi ($1 \text{ psi} \approx 6,9 \text{ кПа}$) і фунт-фути ($1 \text{ lbf} \cdot \text{ft} \approx 1,36 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Користуватися ними допустимо, але у формули підставляють величини в СІ. Типова

помилка — підставити швидкість у км/год у формулу гальмівного шляху: результат виходить у 13 разів більшим і при цьому має «правдоподібний» вигляд.

Зверніть увагу: момент затягування різьбового з'єднання і робота вимірюються у «тих самих» Н·м, але фізично це різні величини. Для моменту сили пишуть Н·м, для роботи й енергії — джоулі. Перевірка розмірності — найпростіший і найнадійніший спосіб самоконтролю: якщо в задачі на потужність у відповіді вийшли джоулі, помилку треба шукати у формулі, а не в арифметиці.

3. Прямі та непрямі вимірювання

Пряме вимірювання — зчитування величини зі шкали приладу: тиску з шинного манометра, напруги з мультиметра, зазору щупом, діаметра шийки вала мікрометром.

Непряме вимірювання — обчислення шуканої величини за формулою через інші, виміряні прямо. Потужність двигуна на стенді обчислюють за виміряними крутним моментом і частотою обертання. Витрату повітря електронний блок керування обчислює за сигналом датчика масової витрати. Внутрішній опір акумулятора визначають за спадом напруги під навантаженням. Швидкість автомобіля спідометр обчислює за частотою обертання вала коробки передач або коліс, тому заміна шин на шини іншого розміру вносить систематичну похибку в покази спідометра й одометра.

Сучасна діагностика автомобіля майже повністю складається з непрямих вимірювань: сканер показує не «стан двигуна», а числа від датчиків, кожне з яких має свою похибку. Тому розуміння того, як похибки накопичуються, є професійною необхідністю.

4. Похибки вимірювань

Абсолютна похибка Δx — модуль різниці між вимірним і дійсним значенням; має розмірність самої величини. Відносна похибка ε — відношення абсолютної похибки до виміряного значення, зазвичай у відсотках. Саме вона характеризує якість вимірювання: похибка 1 мм при вимірюванні колісної бази несуттєва, а при вимірюванні зазору в замку поршневого кільця неприпустима.

Систематична похибка повторюється й зміщує результат в один бік: неправильно відкалібрований динамометричний ключ, неврахований опір щупів мультиметра, манометр, що «зістарився». Повторення вимірювання її не усуває. Випадкова похибка змінює знак і величину від досліду до досліду; її зменшують повторенням вимірювань та усередненням.

Клас точності приладу задає зведену похибку у відсотках від межі вимірювання. Шинний манометр класу 2,5 з межею 6 бар має абсолютну похибку 0,15 бар незалежно від показу. Якщо він показує 2,2 бар, відносна похибка становить близько 7 %, тобто прилад може «не помітити» недокачування на 0,15 бар. Практичне правило: робоче значення має припадати приблизно на дві третини шкали.

Похибку округлюють до однієї значущої цифри, а результат — до того самого розряду. Запис « $2,237 \pm 0,15$ бар» некоректний; правильно « $2,2 \pm 0,2$ бар». Зайві цифри не додають точності, а лише вводять в оману.

Ключові формули

- Абсолютна похибка: $\Delta x = |x - x_{\text{дійсн}}|$
- Відносна похибка: $\varepsilon = \Delta x / x \cdot 100 \%$

- Похибка за класом точності: $\Delta x = K \cdot x_{\text{межа}} / 100$
- Похибка добутку або частки: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$
- Похибка величини у степені n : $\varepsilon = n \cdot \varepsilon_1$
- 1 бар = 10^5 Па; 1 к.с. = 735,5 Вт; 1 км/год = 1/3,6 м/с

Питання для самоконтролю

1. Чому потужність двигуна на стенді є результатом непрямого вимірювання? Від похибок яких приладів вона залежить?
2. Манометр класу 1,5 з межею 10 бар використовують для перевірки тиску в шинах легкового автомобіля (2,3 бар). Обчисліть абсолютну та відносну похибку. Чи вдало дібрано прилад?
3. Чому після встановлення шин більшого діаметра спідометр показує неправильно? Яка це похибка — систематична чи випадкова?

ЛЕКЦІЯ 2

КІНЕМАТИКА ПОСТУПАЛЬНОГО ТА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

План лекції

1. Механічний рух. Система відліку. Кінематичні характеристики.
2. Рівноприскорений рух. Розгін і гальмування автомобіля.
3. Рух по колу. Рух автомобіля на повороті.
4. Кінематика обертального руху. Передаточні числа.

1. Механічний рух і його характеристики

Механічний рух — зміна положення тіла відносно інших тіл з часом. Щоб описати рух, потрібна система відліку: тіло відліку, пов'язана з ним система координат і годинник. Швидкість автомобіля 90 км/год указана відносно дороги; відносно зустрічного автомобіля з такою самою швидкістю вона становить 180 км/год, і саме ця відносна швидкість визначає наслідки лобового зіткнення.

Якщо розмірами тіла в задачі можна знехтувати, його розглядають як матеріальну точку. Для розрахунку часу поїздки автомобіль — точка; для розрахунку повороту — ні.

Траєкторія — лінія, яку описує тіло. Шлях — довжина траєкторії, скалярна величина; його фіксує одометр. Переміщення — вектор від початкової точки до кінцевої. Після кільцевого рейсу шлях дорівнює сотням кілометрів, а переміщення — нулю.

Швидкість — векторна величина, що показує, як швидко змінюється положення тіла. Прискорення — швидкість зміни швидкості. Прискорення напрямлене за швидкістю під час розгону й проти швидкості під час гальмування.

2. Рівноприскорений рух. Розгін і гальмування

Під час рівноприскореного руху швидкість змінюється лінійно, а шлях залежить від часу квадратично. Динамічні якості автомобіля характеризують часом розгону від 0 до 100 км/год. Якщо цей час становить 10 с, середнє прискорення дорівнює $27,8 / 10 \approx 2,8$ м/с².

Для гальмування найважливіша формула пов'язує шлях зі швидкістю без часу: $s = v^2 / (2a)$. Шлях гальмування пропорційний квадрату швидкості. Автомобіль, що гальмує з 90 км/год (25 м/с) зі сповільненням 7 м/с², проходить $625 / 14 \approx 45$ м. З 60 км/год (16,7 м/с) —

лише 20 м. Збільшення швидкості в півтора раза подовжує гальмівний шлях у 2,25 раза. Це фізичне обґрунтування обмежень швидкості в населених пунктах.

Повний зупинний шлях складається з шляху, пройденого за час реакції водія й спрацювання гальмівного приводу (рух рівномірний), і власне гальмівного шляху. За часу реакції 1 с автомобіль на 90 км/год проходить ще 25 м, не почавши гальмувати.

Графіки руху — робочий інструмент аналізу. На графіку $v(t)$ прискорення дорівнює нахилу лінії, а пройдений шлях — площі під графіком. Тахографи та реєстратори подій (EDR) записують саме такі залежності, і їх аналіз застосовують під час експертизи ДТП.

3. Рух по колу

Під час рівномірного руху по колу модуль швидкості сталий, але напрямок змінюється, отже, прискорення існує. Воно напрямлене до центра кола і називається доцентровим: $a = v^2 / R$.

На повороті радіусом 50 м зі швидкістю 72 км/год (20 м/с) доцентрове прискорення становить 8 м/с^2 , тобто близько $0,8g$. Це прискорення має забезпечити сила зчеплення шин з дорогою. На мокрому покритті вона може виявитися меншою — і автомобіль піде по дотичній. Зверніть увагу на квадрат швидкості: зниження швидкості на повороті вдвічі зменшує потрібне зчеплення вчетверо.

Період T — час одного оберту; частота ν — кількість обертів за секунду; кутова швидкість $\omega = 2\pi\nu$ вимірюється в рад/с. У техніці частоту обертання n зазвичай задають в обертах за хвилину, тому $\omega = \pi n / 30$.

4. Кінематика обертального руху. Передаточні числа

Лінійна швидкість точки обертального тіла пов'язана з кутовою: $v = \omega r$. Колесо радіусом 0,3 м на швидкості 90 км/год обертається з кутовою швидкістю $25 / 0,3 \approx 83 \text{ рад/с}$, тобто близько 800 об/хв. Точка протектора, що стикається з дорогою, у цей момент нерухома відносно дороги: колесо котиться без проковзування, а верхня точка рухається зі швидкістю $2v$.

Передаточне число пари зубчастих коліс або шківів дорівнює відношенню кутових швидкостей ведучої і веденої ланок: $u = \omega_1 / \omega_2 = z_2 / z_1$. Трансмісія автомобіля — послідовне з'єднання передач: загальне передаточне число дорівнює добутку передаточних чисел коробки передач і головної передачі. Знаючи частоту обертання колінчастого вала, передаточні числа й радіус колеса, можна обчислити швидкість автомобіля на кожній передачі. На цьому ж принципі ґрунтується розрахунок частоти обертання двигуна для заданої швидкості й передачі.

Диференціал дає змогу колесам однієї осі обертатися з різними кутовими швидкостями на повороті: зовнішнє колесо проходить дугу більшого радіуса за той самий час, отже, обертається швидше.

Ключові формули

- Рівноприскорений рух: $v = v_0 + at$; $s = v_0 t + at^2/2$
- Шлях без часу: $s = (v^2 - v_0^2) / (2a)$; гальмівний шлях до зупинки: $s = v_0^2 / (2a)$
- Доцентрове прискорення: $a = v^2/R = \omega^2 R$
- Кутова швидкість: $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T = \pi n/30$ (n в об/хв)
- Зв'язок лінійної та кутової швидкості: $v = \omega r$

– Передаточне число: $u = \omega_1/\omega_2 = z_2/z_1$; $u_{\text{заг}} = u_{\text{КП}} \cdot u_{\text{ГП}}$

Питання для самоконтролю

1. У скільки разів зросте гальмівний шлях, якщо швидкість збільшити з 50 до 90 км/год за незмінного сповільнення?
2. Двигун обертається з частотою 3000 об/хв, передаточне число коробки на п'ятій передачі 0,8, головної передачі 4,0, радіус колеса 0,3 м. Обчисліть швидкість автомобіля.
3. Чому на повороті колеса однієї осі обертаються з різною частотою і який вузол це забезпечує?

ЛЕКЦІЯ 3

ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ. ТЕРТЯ ТА ЗЧЕПЛЕННЯ КОЛІС ІЗ ДОРОГОЮ

План лекції

1. Закони Ньютона. Інерція та маса.
2. Сили в механіці: тяжіння, пружності, тертя.
3. Зчеплення колеса з дорогою. Гальмування і робота АБС.
4. Сили опору руху. Рівняння руху автомобіля.

1. Закони Ньютона

Перший закон: існують системи відліку, у яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки на нього не діють інші тіла або дія сил скомпенсована. Такі системи називають інерціальними. Під час різкого гальмування пасажир кидає вперед не якась «сила інерції», а його тіло продовжує рух, тоді як автомобіль сповільнюється. Ремінь безпеки прикладає до пасажирів силу, що зупиняє його разом з автомобілем.

Другий закон: прискорення тіла пропорційне рівнодійній сил і обернено пропорційне масі, $a = F/m$. Маса — міра інертності. Завантажена вантажівка з тією самою силою тяги розганяється повільніше й потребує більшого гальмівного зусилля.

Третій закон: тіла діють одне на одне із силами, рівними за модулем і протилежними за напрямком. Колесо відштовхує дорогу назад, дорога штовхає колесо вперед — саме ця сила реакції дороги рухає автомобіль. Двигун — внутрішнє джерело енергії, але зовнішньою силою, що розганяє автомобіль, є сила зчеплення з дорогою. На ідеально слизькому льоду найпотужніший двигун автомобіль не зрушить.

2. Сили в механіці

Сила тяжіння $F = mg$ спрямована до центра Землі, $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$. Вага — сила, з якою тіло тисне на опору; на горизонтальній дорозі вона дорівнює силі тяжіння, на схилі — зменшується, а в западині на швидкості — зростає.

Сила пружності виникає під час деформації і в межах пружності пропорційна їй: $F = kx$ (закон Гука). На ньому ґрунтується робота пружин підвіски, клапанних пружин, динамометрів.

Сила тертя ковзання $F = \mu N$, де N — сила нормального тиску, μ — коефіцієнт тертя, що залежить від матеріалів і стану поверхонь. Сила тертя спокою змінюється від нуля до

максимального значення, яке трохи більше за силу тертя ковзання. Опір коченню значно менший за тертя ковзання — тому підшипники кочення й колеса.

Тертя в автомобілі корисне й шкідливе одночасно. Корисне: гальма, зчеплення, пасові передачі, контакт шини з дорогою. Шкідливе: тертя в циліндро-поршневій групі та підшипниках, на яке витрачається частина потужності двигуна і яке спричиняє зношування.

3. Зчеплення колеса з дорогою. Гальмування

Максимальна сила, яку колесо може передати дорозі — тягова чи гальмівна, — дорівнює $F_{зч} = \varphi N$, де φ — коефіцієнт зчеплення. Орієнтовні значення: сухий асфальт 0,7–0,8; мокрий 0,4–0,5; укочений сніг 0,2–0,3; лід 0,05–0,1.

Максимальне сповільнення за гальмування всіма колесами $a = \varphi g$, звідки гальмівний шлях $s = v^2 / (2\varphi g)$. З 90 км/год на сухому асфальті ($\varphi = 0,7$) шлях становить $625 / 13,7 \approx 46$ м, на льоду ($\varphi = 0,1$) — понад 300 м. Жодна гальмівна система не забезпечить сповільнення, більшого за те, що дозволяє зчеплення.

Коли колесо заблоковане й ковзає, діє тертя ковзання, а воно менше за максимальне тертя спокою. До того ж заблоковане колесо не створює бічної сили, і автомобіль втрачає керованість. Антиблокувальна система (АБС) за сигналами датчиків частоти обертання коліс виявляє початок блокування й короткочасно знижує тиск у гальмівному приводі, утримуючи колесо в зоні невеликого проковзування (близько 10–20 %), де зчеплення максимальне. Протибуксувальна система розв'язує дзеркальну задачу під час розгону.

Зчеплення залежить від стану шини. Протектор відводить воду з плями контакту; якщо вода не встигає відводитися, між шиною і дорогою утворюється водяний клин — аквапланування, і коефіцієнт зчеплення падає майже до нуля.

4. Сили опору руху. Рівняння руху автомобіля

На автомобіль, що рухається, діють сили опору. Опір коченню $F_f = f \cdot m \cdot g$, де f — коефіцієнт опору коченню (для легкової шини на асфальті 0,012–0,018; зростає за недостатнього тиску в шині). Опір підйому $F_{п} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$. Опір повітря $F_v = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$, де c_x — коефіцієнт аеродинамічного опору, S — площа лобового перерізу, $\rho \approx 1,2$ кг/м³ — густина повітря. Під час розгону додатково долається інерція як поступально рухомої маси, так і обертових деталей трансмісії та коліс; це враховують коефіцієнтом обертових мас δ .

Рівняння руху (тягового балансу): $F_t = F_f + F_{п} + F_v + \delta \cdot m \cdot a$. Сила тяги на ведучих колесах $F_t = M \cdot \eta_{тр} / r$, де M — крутний момент двигуна, $\eta_{тр}$ — ККД трансмісії, r — радіус колеса.

Приклад. Автомобіль масою 1500 кг, $f = 0,015$, $c_x = 0,32$, $S = 2,2$ м² на рівній дорозі зі швидкістю 90 км/год. Опір коченню $0,015 \cdot 1500 \cdot 9,81 \approx 220$ Н; опір повітря $0,5 \cdot 0,32 \cdot 1,2 \cdot 2,2 \cdot 625 \approx 264$ Н. Уже на 90 км/год опір повітря перевищує опір коченню, а на 130 км/год він зростає ще вдвічі. Звідси різке зростання витрати палива на великих швидкостях і вплив багажника на даху.

Ключові формули

- Другий закон Ньютона: $F = ma$
- Сила тертя ковзання: $F = \mu N$; сила зчеплення: $F_{зч} = \varphi N$
- Гальмівний шлях за граничного зчеплення: $s = v^2 / (2\varphi g)$
- Опір коченню: $F_f = f \cdot m \cdot g$; опір підйому: $F_{п} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

- Опір повітря: $F_v = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$
- Сила тяги: $F_t = M \cdot u_{заг} \cdot \eta_{тр} / r$
- Рівняння руху: $F_t = F_f + F_{п} + F_v + \delta \cdot m \cdot a$

Питання для самоконтролю

1. Чому заблоковане колесо гальмує гірше, ніж колесо, що обертається з невеликим проковзуванням? Як це використовує АБС?
2. Обчисліть гальмівний шлях автомобіля з 60 км/год на мокрому асфальті ($\phi = 0,45$) і на сухому ($\phi = 0,75$).
3. Як зміниться опір повітря, якщо швидкість збільшити з 90 до 120 км/год? Чому це позначається на витраті палива?

ЛЕКЦІЯ 4

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, КРУТНИЙ МОМЕНТ, ККД

План лекції

1. Імпульс. Закон збереження імпульсу. Удари та пасивна безпека.
2. Механічна робота і потужність. Крутний момент.
3. Енергія. Закон збереження і перетворення енергії.
4. ККД. Енергетичний баланс автомобіля. Рекуперація.

1. Імпульс і пасивна безпека

Імпульс тіла $p = mv$ — векторна величина. Другий закон Ньютона в імпульсній формі: зміна імпульсу дорівнює імпульсу сили, $\Delta p = F \cdot \Delta t$. З цього випливає головна ідея пасивної безпеки. Зміну імпульсу під час зіткнення задає швидкість і маса, і змінити її неможливо. Зате можна подовжити час, за який вона відбувається, — тоді середня сила зменшиться.

Автомобіль масою 1500 кг на швидкості 54 км/год (15 м/с) має імпульс 22 500 кг·м/с. Якщо зупинка відбувається за 0,05 с (жорстка перешкода, жорсткий кузов), середня сила — 450 кН. Якщо зони програмованої деформації подовжують удар до 0,1 с, сила зменшується вдвічі. Ремінь безпеки з натягувачем і обмежувачем зусилля, подушка безпеки, енергопоглинальна рульова колонка працюють за тим самим принципом: подовжують час і шлях гальмування тіла людини.

Закон збереження імпульсу: у замкненій системі сумарний імпульс тіл не змінюється. У зіткненні двох автомобілів зовнішні сили (тертя об дорогу) за мить удару малі порівняно з силами взаємодії, тому імпульс системи до і після удару практично однаковий. Цей закон — основа автотехнічної експертизи: за слідами руху після удару відновлюють швидкості до удару.

Непружний удар (тіла рухаються далі разом) супроводжується втратою кінетичної енергії на деформацію. Для безпеки це бажано: енергію має поглинути кузов, а не пасажир.

2. Робота, потужність, крутний момент

Механічна робота $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$. Потужність — робота за одиницю часу: $P = A/t$. Для поступального руху $P = F \cdot v$: щоб підтримувати силу тяги 500 Н на швидкості 25 м/с, потрібно 12,5 кВт на колесах.

Для обертального руху аналогом сили є крутний момент M , аналогом швидкості — кутова швидкість: $P = M \cdot \omega = M \cdot \pi n / 30$. Двигун із крутним моментом $200 \text{ Н} \cdot \text{м}$ за 4000 об/хв розвиває $200 \cdot 419 \approx 84 \text{ кВт}$ (114 к.с.).

Зовнішня швидкісна характеристика двигуна — залежність потужності й крутного моменту від частоти обертання — є головним паспортним документом двигуна. Максимум моменту зазвичай лежить нижче максимуму потужності. Коробка передач потрібна саме тому, що двигун розвиває корисний момент лише в обмеженому діапазоні частот, а колесам потрібен великий момент на малій швидкості й помірний — на великій. Коробка перетворює момент і частоту обертання, зберігаючи потужність (за вирахуванням втрат): у скільки разів збільшує момент, у стільки ж зменшує частоту.

3. Енергія і закон збереження енергії

Кінетична енергія $E_k = mv^2/2$. Автомобіль масою 1500 кг на 90 км/год має 470 кДж кінетичної енергії. Під час гальмування до зупинки вся вона перетворюється на теплоту в гальмівних дисках і колодках. Маса дисків невелика, тому серія інтенсивних гальмувань, наприклад на затяжному спуску, нагріває їх до кількох сотень градусів. Для вантажівок на спусках передбачено допоміжні гальма-сповільнювачі.

Потенціальна енергія в полі тяжіння $E_p = mgh$. Під час підйому на висоту 100 м автомобіль масою 1500 кг набуває $1,47 \text{ МДж}$ потенціальної енергії, які двигун мусив дати додатково до роботи проти опорів.

Закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, а лише перетворюється з однієї форми в іншу. Будь-який «пристрій, що економить 30% палива» без зміни фізичних процесів у двигуні, має пояснити, звідки береться енергія. Якщо пояснення немає, заява суперечить закону збереження енергії.

4. ККД і енергетичний баланс автомобіля

Коефіцієнт корисної дії — відношення корисної роботи (потужності) до витраченої: $\eta = A_{\text{кор}}/A_{\text{повн}}$. ККД механічної трансмісії легкового автомобіля становить $0,85\text{--}0,92$; втрати — тертя в зубчастих зачепленнях, підшипниках, перемішування мастила. ККД послідовно з'єднаних механізмів перемножуються: $\eta_{\text{заг}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$.

Енергетичний ланцюг автомобіля: з енергії палива двигун перетворює на механічну роботу лише $25\text{--}40 \%$, трансмісія втрачає ще до 15% від цієї частки, а на колесах отримана робота витрачається на опір коченню, опір повітря, подолання підйомів і розгін. Кінетична енергія розгону в міському циклі значною мірою «спалюється» в гальмах.

Рекуперативне гальмування гібридних автомобілів та електромобілів повертає частину цієї енергії: тяговий електродвигун працює як генератор і заряджає батарею. Саме тому гібриди найбільш економні в міському режимі з частими зупинками, а на трасі їхня перевага мала.

Ключові формули

- Імпульс: $p = mv$; імпульс сили: $\Delta p = F \cdot \Delta t$
- Закон збереження імпульсу: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$; потужність: $P = A/t = F \cdot v$
- Потужність обертального руху: $P = M \cdot \omega = M \cdot \pi n / 30$
- Кінетична енергія: $E_k = mv^2/2$; потенціальна: $E_p = mgh$

– ККД: $\eta = A_{\text{кор}}/A_{\text{повн}}$; для послідовних механізмів $\eta_{\text{заг}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots$

Питання для самоконтролю

1. Чому зони програмованої деформації роблять кузов «м'якшим» спереду й позаду, але жорстким у зоні салону?
2. Двигун розвиває крутний момент 320 Н·м за 2000 об/хв. Обчисліть потужність у кіловатах і кінських силах.
3. Скільки теплоти виділяється в гальмах автомобіля масою 1800 кг під час гальмування з 108 км/год до зупинки? Куди «зникає» ця енергія в електромобілі з рекуперацією?

ЛЕКЦІЯ 5

СТАТИКА. МОМЕНТ СИЛИ. ЦЕНТР МАС. СТІЙКІСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

План лекції

1. Момент сили. Правило моментів. Умови рівноваги.
2. Центр мас. Розподіл ваги автомобіля по осях.
3. Перерозподіл навантаження під час розгону та гальмування.
4. Стійкість автомобіля проти перекидання і бічного ковзання.

1. Момент сили та умови рівноваги

Обертальну дію сили характеризує момент сили $M = F \cdot l$, де l — плече, найкоротша відстань від осі обертання до лінії дії сили. Динамометричний ключ завдовжки 0,4 м, до руків'я якого прикладено 100 Н, створює момент 40 Н·м. Подовження ключа трубою збільшує момент, але робить затягування неконтрольованим і загрожує зривом різьби або шпильки.

Правило моментів: тіло з нерухомою віссю перебуває в рівновазі, якщо сума моментів, що обертають його за годинниковою стрілкою, дорівнює сумі моментів проти годинникової. На правилі моментів працюють важелі гальмівної педалі та педалі зчеплення, ручний важіль стоянкового гальма, монтажна лопатка, механічний домкрат.

Умови рівноваги твердого тіла: векторна сума сил дорівнює нулю, і сума моментів відносно будь-якої осі дорівнює нулю. Перша умова забезпечує відсутність поступального руху, друга — обертання.

2. Центр мас. Розподіл ваги по осях

Центр мас — точка, у якій можна вважати зосередженою всю масу тіла під час розрахунку поступального руху; в однорідному полі тяжіння він збігається з центром тяжіння. Його положення визначають зважуванням: автомобіль послідовно заїжджає передньою і задньою віссю на ваги.

Нехай колісна база L , центр мас розташований на відстані a від передньої осі. З рівняння моментів відносно передньої осі реакція задньої осі $R_2 = mg \cdot a/L$, передньої — $R_1 = mg \cdot (L - a)/L$. Для переднеприводного легкового автомобіля на передню вісь припадає близько 60 % маси. Розподіл впливає на керованість, навантаження шин, ефективність гальмування. Під час розміщення вантажу у вантажівці перевантаження однієї осі понад норму руйнує дорожнє покриття й шини, тому його контролюють ваговими пунктами.

3. Перерозподіл навантаження

Під час гальмування сила інерції прикладена в центрі мас, розташованому на висоті h над дорогою, а гальмівні сили — у плямах контакту. Ці сили утворюють пару, що «кліє» автомобіль носом: передня вісь довантажується, задня розвантажується на $\Delta R = m \cdot a \cdot h / L$.

Приклад: $m = 1500$ кг, сповільнення 5 м/с^2 , $h = 0,55$ м, $L = 2,6$ м. $\Delta R = 1500 \cdot 5 \cdot 0,55 / 2,6 \approx 1590$ Н, тобто близько 160 кг «переїжджає» з задньої осі на передню. Тому передні гальмівні механізми роблять потужнішими (часто дисковими), а в гальмівному приводі встановлюють регулятор, що обмежує тиск у задніх контурах, або цю функцію виконує електронний розподіл гальмівних зусиль у складі АБС. Під час розгону картина протилежна: розвантажується передня вісь, і переднеприводний автомобіль на слизькому покритті легше пробуксовує.

4. Стійкість проти перекидання і ковзання

Рівновага буває стійкою, нестійкою та байдужою. Тіло на опорі стійке, доки вертикаль, проведена через центр мас, проходить у межах площі опори. Для автомобіля площа опори — прямокутник, утворений колією B і базою L .

На повороті радіусом R діє доцентрова сила, яку забезпечує зчеплення. Відносно зовнішніх коліс вона створює перекидальний момент. Перекидання не станеться, доки $v < \sqrt{(g \cdot R \cdot B / (2h))}$. Бічного ковзання не буде, доки $v < \sqrt{(\varphi \cdot g \cdot R)}$. Для легкового автомобіля ($B = 1,5$ м, $h = 0,55$ м) на повороті $R = 50$ м гранична за перекиданням швидкість — близько 26 м/с, а за ковзанням на сухому асфальті ($\varphi = 0,7$) — 18,5 м/с. Легковий автомобіль спочатку піде в занос, а не перекинеться — так закладено конструкцією. У вантажівки, автобуса, позашляховика центр мас високий, і співвідношення може стати протилежним — особливо з вантажем на даху чи рідиною в цистерні, що переливається.

Висота центра мас і колія — головні геометричні параметри стійкості. Тому в розвантаженої вантажівки й автобуса з повним салоном різна поведінка на поворотах, а системи курсової стійкості (ESP) обмежують швидкість і пригальмовують окремі колеса, коли бічне прискорення наближається до небезпечного.

Ключові формули

- Момент сили: $M = F \cdot l$
- Умови рівноваги: $\Sigma F = 0$; $\Sigma M = 0$
- Реакції осей: $R_1 = mg \cdot (L - a) / L$; $R_2 = mg \cdot a / L$
- Перерозподіл навантаження: $\Delta R = m \cdot a \cdot h / L$
- Гранична швидкість за перекиданням: $v = \sqrt{(g \cdot R \cdot B / (2h))}$
- Гранична швидкість за ковзанням: $v = \sqrt{(\varphi \cdot g \cdot R)}$

Питання для самоконтролю

1. Чому подовження ключа трубою під час затягування відповідальних з'єднань неприпустиме?
2. Автомобіль масою 1200 кг, база 2,5 м, центр мас на відстані 1,0 м від передньої осі. Знайдіть навантаження на кожну вісь.
3. Чому вантаж на даху легкового автомобіля погіршує його стійкість на поворотах? Відповідь обґрунтуйте формулою.

ЛЕКЦІЯ 6

МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА. НАПРУЖЕННЯ, ЗАКОН ГУКА, ЖОРСТКІСТЬ. ОСНОВИ ГІДРО- ТА АЕРОДИНАМІКИ

План лекції

1. Деформації. Напруження. Закон Гука. Діаграма розтягу.
2. Жорсткість пружних елементів. Втома матеріалу.
3. Тиск. Закон Паскаля. Гідравлічний привод гальм. Гідростатичний тиск і закон Архімеда.
4. Рух рідин і газів. Рівняння нерозривності. Аеродинамічний опір.

1. Деформації та закон Гука

Деформація — зміна форми чи розмірів тіла під дією сил. Розрізняють розтяг і стиск (шатун, болти головки блока), зсув (шпонки, заклепки), кручення (торсіони, карданні й піввісні вали), згин (ресори, балки мостів). Пружна деформація зникає після зняття навантаження, пластична — залишається.

Механічне напруження $\sigma = F/S$ — сила, що припадає на одиницю площі перерізу, вимірюється в паскалях (на практиці в МПа). Відносна деформація $\epsilon = \Delta l/l_0$. У межах пружності $\sigma = E \cdot \epsilon$, де E — модуль Юнга: для сталі близько $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, для алюмінієвих сплавів — приблизно втричі менше.

Діаграма розтягу показує поведінку матеріалу аж до руйнування: лінійна ділянка (виконується закон Гука), границя пружності, границя текучості (матеріал «тече» без збільшення навантаження), границя міцності (найбільше напруження перед руйнуванням). Болт головки блока, затягнутий із заданим моментом, працює в зоні пружності і діє як пружина, що притискає головку. Болти, які затягують «в зону текучості» за кутом повороту, після зняття подовжені і для повторного використання непридатні — це пряма вимога заводських інструкцій, що впливає з діаграми розтягу.

2. Жорсткість. Пружні елементи підвіски. Втома

Для пружного елемента зручніша характеристика — жорсткість $k = F/x$, Н/м. Жорсткість залежить не лише від матеріалу, а й від геометрії: діаметра дроту, кількості витків і діаметра пружини, довжини й перерізу листів ресори, довжини й діаметра торсіона.

Пружні елементи підвіски: гвинтові пружини, листові ресори (також виконують функцію напрямного елемента), торсіони, пневмоелементи, стабілізатори поперечної стійкості (торсіон, що закручується, коли колеса однієї осі переміщуються по-різному, і зменшує крен). Під статичним навантаженням пружний елемент стискається на величину статичного прогину $x = mg/k$. «Просідання» автомобіля з віком — це втрата жорсткості та залишкова пластична деформація пружин.

Втома матеріалу — руйнування за багаторазових змінних навантажень, значно менших від границі міцності. Тріщина зароджується в концентраторі напружень (подряпина, корозійна виразка, гострий перехід перерізу) і поступово росте. Так ламаються пружини, листи ресор, піввіси, колінчасті вали. Злам від втоми має характерну гладку зону повільного росту тріщини і зернисту зону остаточного руйнування — за нею причину поломки визначають під час дефектування.

3. Тиск. Закон Паскаля. Гідростатика

Тиск $p = F/S$. Закон Паскаля: тиск, прикладений до рідини в замкненому об'ємі, передається без змін у кожному точку рідини. На ньому ґрунтуються гідравлічний привод гальм і зчеплення, гідравлічні домкрати й підйомники, гідропідсилювач керма.

У гідроприводі гальм водій через педаль і вакуумний підсилювач діє на поршень головного циліндра. Тиск однаковий у всій системі, а сила на поршні колісного циліндра пропорційна його площі: $F_2 = F_1 \cdot S_2/S_1$. Якщо діаметр головного циліндра 20 мм, а колісного 40 мм, сила зростає вчетверо. Виграш у силі оплачується програшем у переміщенні — закон збереження енергії не порушується. Повітря в гальмівній системі стискається, на відміну від рідини, тому педаль стає «м'якою» — звідси обов'язкове прокачування гальм.

Гідростатичний тиск стовпа рідини $p = \rho gh$ не залежить від форми посудини. Закон Архімеда: на тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила $F_A = \rho_{\text{рідини}} \cdot g \cdot V_{\text{занур}}$. На ньому працює ареометр — поплавець, глибина занурення якого залежить від густини рідини. Ареометром перевіряють густину електроліту в акумуляторі та охолоджувальної рідини, а отже, ступінь зарядженості батареї і температуру замерзання антифризу.

4. Рух рідин і газів. Аеродинаміка

Для стаціонарного потоку нестисливої рідини виконується рівняння нерозривності: $S_1 v_1 = S_2 v_2$. Там, де переріз менший, швидкість більша. У звуженні швидкість зростає, а статичний тиск падає (рівняння Бернуллі) — на цьому ґрунтується дифузор карбюратора, ежектор, розпилювач. В'язкість рідини спричиняє втрати тиску в трубопроводах і каналах змащувальної системи.

Під час руху автомобіля повітря чинить опір, який складається з опору форми (завихрення за кормою) і тертя повітря об поверхню. Сила опору $F_v = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$. Коефіцієнт c_x сучасних легкових автомобілів становить 0,25–0,35, вантажівок і автобусів — 0,6–0,9. Обтічники на кабінах тягачів, закриті днища, гладкі дзеркала зменшують c_x і, відповідно, витрату палива на трасі. Потужність на подолання опору повітря пропорційна кубу швидкості, тому збільшення швидкості з 90 до 110 км/год потребує майже вдвічі більшої потужності лише на аеродинаміку.

Ключові формули

- Напруження: $\sigma = F/S$; відносна деформація: $\varepsilon = \Delta l/l_0$
- Закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$; $F = k \cdot x$
- Статичний прогин пружного елемента: $x = mg/k$
- Тиск: $p = F/S$; гідропривод: $F_2/F_1 = S_2/S_1$
- Гідростатичний тиск: $p = \rho gh$; сила Архімеда: $F_A = \rho \cdot g \cdot V$
- Рівняння нерозривності: $S_1 v_1 = S_2 v_2$
- Потужність опору повітря: $P_v = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$

Питання для самоконтролю

1. Чому болти, затягнуті «в зону текучості», не можна використовувати повторно? Поясніть за діаграмою розтягу.

2. Діаметр головного гальмівного циліндра 22 мм, колісного — 48 мм. Сила на штоку головного циліндра 1000 Н. Знайдіть тиск у системі та силу на поршні колісного циліндра.

3. Чому повітря в гідроприводі гальм робить педаль «м'якою» і небезпечно знижує ефективність гальмування?

МОДУЛЬ II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

5 лекцій, 10 годин

ЛЕКЦІЯ 7

ОСНОВИ МКТ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ. РІВНЯННЯ СТАНУ

План лекції

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Ідеальний газ. Тиск і температура з погляду МКТ.
3. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроееси.
4. Газові закони в роботі двигуна і шин. Ступінь стиснення.

1. Основні положення МКТ

Молекулярно-кінетична теорія спирається на три положення, кожне з яких підтверджене дослідно: речовина складається з частинок (молекул, атомів, іонів); частинки безперервно й хаотично рухаються; між частинками діють сили притягання і відштовхування.

Хаотичний рух доводять дифузія й броунівський рух. Дифузією пояснюється, чому запах пального швидко поширюється гаражем, а пари бензину, важчі за повітря, накопичуються в оглядовій ямі — звідси вимога провітрювання ям і заборона відкритого вогню. Сили взаємодії пояснюють існування твердих тіл і рідин, їхню пружність і в'язкість.

Кількість речовини ν вимірюють у молях. Один моль містить $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ частинок (стала Авогадро). Молярна маса M — маса одного моля: для повітря 0,029 кг/моль, для азоту 0,028, для кисню 0,032, для водню 0,002 кг/моль.

2. Ідеальний газ. Тиск і температура

Ідеальний газ — модель, у якій молекули вважаються точками, що взаємодіють лише під час зіткнень. Модель добре описує повітря, продукти згоряння і пари палива за тисків до кількох десятків атмосфер і температур, далеких від конденсації.

Тиск газу — результат ударів молекул об стінки. Основне рівняння МКТ: $p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2$, де n — концентрація молекул. Тиск зростає, якщо збільшити кількість молекул в одиниці об'єму (накачування шини, наддув двигуна) або їх швидкість (нагрівання).

Температура — міра середньої кінетичної енергії поступального руху молекул: $E = (3/2) \cdot k \cdot T$, де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — стала Больцмана. У газових законах використовують абсолютну температуру: $T = t + 273$. Підставити у формулу градуси Цельсія — одна з найчастіших помилок у задачах.

3. Рівняння стану ідеального газу. Ізопроееси

Рівняння Менделєєва — Клапейрона: $pV = (\nu/M) \cdot R \cdot T$, де $R = 8,31$ Дж/(моль · К) — універсальна газова стала. Для незмінної маси газу $pV/T = \text{const}$.

Ізопроееси — проєеси за сталого одного з параметрів:

ізоермічний ($T = \text{const}$): $pV = \text{const}$ — закон Бойля — Маріотта;

ізобарний ($p = \text{const}$): $V/T = \text{const}$ — закон Гей-Люссака;

ізохорний ($V = \text{const}$): $p/T = \text{const}$ — закон Шарля.

Реальні процеси в двигуні не є ізопроцесами в чистому вигляді, але ідеалізовані цикли складаються саме з них та адіабат, і це дає змогу оцінити граничні можливості двигуна.

4. Газові закони в автомобілі

Тиск у шинах. Шинний манометр показує надлишковий тиск — різницю між абсолютним тиском у шині й атмосферним. У газові закони підставляють абсолютний тиск. Шина накачана до 2,2 бар (надлишковий) за 20 °С, абсолютний тиск — 3,2 бар. Після тривалого руху по трасі повітря в шині нагрілося до 60 °С. Об'єм шини майже незмінний, процес ізохорний: $p_2 = 3,2 \cdot 333/293 \approx 3,64$ бар абсолютного, тобто 2,44 бар надлишкового. Тому тиск перевіряють і регулюють на холодних шинах, а «скидати» тиск, що зріс після поїздки, не можна. Узимку картина протилежна: шина, накачана в теплом боксі за 20 °С, на морозі –15 °С втрачає близько 0,4 бар.

Ступінь стиснення. Над поршнем у нижній мертвій точці об'єм циліндра $V_a = V_h + V_c$, де V_h — робочий об'єм, V_c — об'єм камери згоряння. Ступінь стиснення $\varepsilon = V_a/V_c$. Для $V_h = 0,5$ л і $V_c = 0,05$ л $\varepsilon = 11$. Бензинові двигуни мають $\varepsilon = 9$ –12, дизелі — 15–22. Під час стиснення тиск і температура суміші зростають; як саме — розглянемо на наступній лекції, бо процес стиснення швидкий і відбувається майже без теплообміну.

Наповнення циліндра. Маса повітря, що потрапляє в циліндр за такт, пропорційна густині повітря на впуску: $\rho = pM/(RT)$. Нагріте повітря має меншу густину, отже, в циліндр потрапляє менше кисню й двигун розвиває меншу потужність. Тому прагнуть охолоджувати впускне повітря (холодний забір, проміжний охолоджувач наддувного повітря — інтеркулер), а влітку в спеку двигун відчутно «слабшає».

Ключові формули

- Кількість речовини: $\nu = m/M = N/N_A$
- Основне рівняння МКТ: $p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_0 \cdot v^2$; $p = n \cdot k \cdot T$
- Середня кінетична енергія молекули: $E = (3/2) \cdot k \cdot T$
- Рівняння стану: $pV = (m/M) \cdot R \cdot T$; для сталої маси $pV/T = \text{const}$
- Абсолютна температура: $T = t + 273$
- Густина газу: $\rho = pM/(RT)$
- Ступінь стиснення: $\varepsilon = (V_h + V_c)/V_c$

Питання для самоконтролю

1. Чому тиск у шинах регулюють на холодних шинах? Обчисліть, яким буде надлишковий тиск о –20 °С у шині, накачаній до 2,3 бар за 20 °С.
2. Робочий об'єм циліндра 0,4 л, об'єм камери згоряння 0,04 л. Обчисліть ступінь стиснення.
3. Чому двигун розвиває меншу потужність у спеку і на великій висоті над рівнем моря?

ЛЕКЦІЯ 8

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Внутрішня енергія та способи її зміни. Кількість теплоти.
2. Теплоємність. Рівняння теплового балансу. Теплота згоряння палива.
3. Робота газу. Перший закон термодинаміки. Адіабатний процес.
4. Займання суміші в циліндрі. Октанове і цетанове числа. Детонація.

1. Внутрішня енергія і кількість теплоти

Внутрішня енергія — сума кінетичної енергії хаотичного руху частинок і потенціальної енергії їх взаємодії. Для ідеального газу вона визначається лише температурою.

Змінити внутрішню енергію можна двома способами: виконавши роботу (стиснення суміші поршнем, тертя в гальмах) або через теплообмін (нагрівання охолоджувальної рідини від стінок циліндра). Кількість теплоти Q — енергія, передана під час теплообміну, вимірюється в джоулях.

2. Теплоємність, тепловий баланс, теплота згоряння

Питома теплоємність c — кількість теплоти, потрібна для нагрівання 1 кг речовини на 1 К: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$. Для води 4190 Дж/(кг·К) — одна з найбільших серед рідин, тому вода є основою охолоджувальних рідин. Для водно-гліколевого антифризу — близько 3400–3600, для моторного мастила близько 2000, для сталі близько 460, для чавуну близько 540, для алюмінію близько 900 Дж/(кг·К).

Рівняння теплового балансу: у теплоізовованій системі кількість теплоти, віддана гарячими тілами, дорівнює кількості теплоти, отриманій холодними. На ньому ґрунтуються розрахунки прогрівання двигуна, радіатора, опалювача салону.

Під час згоряння палива виділяється кількість теплоти $Q = q \cdot m$, де q — питома теплота згоряння (нижча теплотворна здатність). Для бензину близько 44 МДж/кг, для дизельного палива близько 42,5 МДж/кг, для зрідженого газу пропан-бутан близько 46 МДж/кг, для метану близько 50 МДж/кг. Густина бензину близько 0,74 кг/л, дизельного палива близько 0,84 кг/л. Отже, літр бензину містить близько 32,6 МДж, а літр дизпалива — близько 35,7 МДж. Саме тому за однакового ККД дизель проїде на літрі палива більше, ніж бензиновий двигун, — навіть до урахування його вищого ККД.

3. Перший закон термодинаміки

Газ, розширюючись, виконує роботу. За сталого тиску $A = p \cdot \Delta V$; у загальному випадку робота дорівнює площі під графіком процесу на діаграмі p – V . Індикаторна діаграма — записана залежність тиску в циліндрі від положення поршня — і є такою діаграмою; площа її петлі дорівнює роботі газу за цикл.

Перший закон термодинаміки — закон збереження енергії для теплових процесів: кількість теплоти, передана системі, іде на зміну її внутрішньої енергії та на виконання роботи: $Q = \Delta U + A$.

Застосування до ізопроеесів: в ізохорному процесі робота дорівнює нулю, уся теплота змінює внутрішню енергію (ідеалізоване швидке згоряння бензинової суміші

поблизу верхньої мертвої точки); в ізобарному теплота йде і на нагрівання, і на роботу; в ізотермічному внутрішня енергія не змінюється, і вся теплота перетворюється на роботу.

Адіабатний процес відбувається без теплообміну: $Q = 0$, отже, $A = -\Delta U$. Під час адіабатного стиснення робота поршня повністю йде на нагрівання газу; під час розширення газ виконує роботу за рахунок власної внутрішньої енергії й охолоджується. Такти стиснення і розширення тривають тисячні частки секунди, теплообмін за цей час малий, тому їх наближено вважають адіабатними. Рівняння адіабати: $pV^\gamma = \text{const}$, або $T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$; для повітря $\gamma \approx 1,4$.

4. Займання суміші. Октанове і цетанове числа. Детонація

Температура наприкінці адіабатного стиснення $T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\gamma-1}$. Для бензинового двигуна ($\epsilon = 10$, $T_1 = 320 \text{ K}$): $T_2 = 320 \cdot 10^{0.4} \approx 800 \text{ K}$, тобто близько 530°C . Для дизеля ($\epsilon = 18$): $T_2 = 320 \cdot 18^{0.4} \approx 1020 \text{ K}$, близько 750°C . Цього достатньо, щоб впорснуте дизельне паливо самозайнялося — дизелю не потрібна свічка запалювання. Холодний дизель заводиться важко саме тому, що холодні стінки відбирають теплоту в стиснутого повітря; свічки розжарювання підігрівають камеру згоряння.

У бензиновому двигуні самозаймання небажане. Суміш підпалює іскра, і фронт полум'я має плавно пройти камеру згоряння. Якщо частина суміші попереду фронту, стиснута й нагріта, самозаймається вибухоподібно, виникає детонація — ударні хвилі тиску, дзвінкий металевий стук, перегрів і руйнування поршнів, прогорання прокладки. Октанове число характеризує стійкість бензину до детонації: що воно вище, то більший ступінь стиснення допускає двигун. Датчик детонації — п'єзоелектричний датчик на блоці циліндрів — «чує» характерні коливання, і блок керування зменшує кут випередження запалювання.

Для дизельного палива важлива протилежна властивість — здатність швидко самозайматися, яку характеризує цетанове число. Паливо з низьким цетановим числом займається з запізненням, накопичена за цей час порція згоряє різко — дизель працює «жорстко».

Ключові формули

- Кількість теплоти: $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$
- Теплота згоряння: $Q = q \cdot m$
- Рівняння теплового балансу: $Q_{\text{відд}} = Q_{\text{отрим}}$
- Робота газу: $A = p \cdot \Delta V$ ($p = \text{const}$)
- Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$
- Адіабата: $pV^\gamma = \text{const}$; $T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$; $T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\gamma-1}$

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно, щоб нагріти 7 л антифризу (густина $1,07 \text{ кг/л}$, $c = 3500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$) від 0 до 90°C ? Скільки для цього потрібно спалити бензину, якщо на нагрівання рідини йде 30% теплоти згоряння?
2. Чому дизель не потребує іскрового запалювання? Обчисліть температуру повітря наприкінці стиснення для $\epsilon = 20$ і $T_1 = 300 \text{ K}$.
3. Що таке детонація і чому заправлення бензином із нижчим октановим числом, ніж рекомендує виробник, небезпечне для двигуна?

ЛЕКЦІЯ 9

ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЦИКЛИ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ: КАРНО, ОТТО, ДИЗЕЛЯ. ККД

План лекції

1. Оборотні й необоротні процеси. Другий закон термодинаміки.
2. Тепловий двигун. Цикл Карно та граничний ККД.
3. Ідеалізовані цикли Отто і Дизеля. Залежність ККД від ступеня стиснення.
4. Індикаторний і ефективний ККД. Турбонаддув.

1. Другий закон термодинаміки

Перший закон дозволяє будь-які перетворення, аби енергія зберігалася. Проте в природі процеси мають напрямок. Теплота сама собою переходить лише від гарячого тіла до холодного. Гальма нагріваються під час гальмування, але, охолоджуючись, не розганяють автомобіль. Такі процеси називають необоротними.

Другий закон термодинаміки у формулюванні Кельвіна: неможливий циклічний процес, єдиним результатом якого було б перетворення теплоти від одного джерела повністю на роботу. Тепловий двигун обов'язково має віддавати частину теплоти холодильнику. Міру необоротності описує ентропія: у замкненій системі вона не зменшується.

2. Тепловий двигун. Цикл Карно

Будь-який тепловий двигун має три складові: нагрівник (у двигуні внутрішнього згоряння — теплота згоряння палива в циліндрі), робоче тіло (повітря і продукти згоряння), холодильник (атмосфера, куди викидаються відпрацьовані гази, і система охолодження). ККД $\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1$.

Цикл Карно — ідеальний оборотний цикл з двох ізотерм і двох адіабат. Його ККД $\eta_K = 1 - T_2/T_1$ — найбільший можливий для двигуна, що працює між температурами T_1 і T_2 . Навіть за температури газів 2300 К і навколишнього середовища 300 К граничний ККД становить 87 %. Реальні двигуни далекі від цієї межі, бо їхні цикли не є циклами Карно, а процеси необоротні.

3. Цикли Отто і Дизеля

Ідеалізований цикл Отто — модель бензинового двигуна: адіабатне стиснення, підведення теплоти за сталого об'єму (швидке згоряння біля ВМТ), адіабатне розширення, відведення теплоти за сталого об'єму (випуск). Його ККД залежить лише від ступеня стиснення: $\eta = 1 - 1/\varepsilon^{\gamma-1}$. Для $\varepsilon = 10$: $\eta = 1 - 1/2,51 \approx 0,60$. Для $\varepsilon = 8$ — 0,56, для $\varepsilon = 12$ — 0,63. Звідси прагнення конструкторів підвищувати ступінь стиснення, яке обмежене детонацією.

Ідеалізований цикл Дизеля: теплота підводиться за сталого тиску, бо паливо впорскується й згоряє поступово, поки поршень уже рухається вниз. ККД залежить від ступеня стиснення і ступеня попереднього розширення $\rho = V_3/V_2$: $\eta = 1 - (\rho^\gamma - 1)/(\gamma \cdot \varepsilon^{\gamma-1} \cdot (\rho - 1))$. Для $\varepsilon = 18$ і $\rho = 2$ $\eta \approx 0,63$. За однакового ступеня стиснення цикл Отто ефективніший, але дизель працює з значно вищим ε , тому в підсумку економніший. Сучасні швидкохідні дизелі працюють за змішаним циклом (частина теплоти підводиться за сталого об'єму, частина — за сталого тиску).

4. Індикаторний і ефективний ККД. Турбонаддув

Реальний ККД значно нижчий від ідеального. Індикаторний ККД η_i враховує реальний цикл у циліндрі: неповноту згоряння, теплообмін зі стінками, неідеальний газообмін; для двигунів він становить 0,35–0,48. Механічний ККД η_m враховує втрати на тертя і привод допоміжних агрегатів (0,75–0,90). Ефективний ККД — частка теплоти палива, що перетворюється на роботу на колінчастому валу: $\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$. Для бензинових двигунів 0,25–0,35, для дизелів 0,35–0,45.

Ефективний ККД визначають за питомою ефективною витратою палива g_e — масою палива на 1 кВт·год роботи: $\eta_e = 3600/(g_e \cdot q)$, де g_e в г/(кВт·год), q в МДж/кг. Для бензинового двигуна з $g_e = 260$ г/(кВт·год): $\eta_e = 3600/(260 \cdot 44) \approx 0,31$. Годинна витрата палива $G_p = g_e \cdot N_e$ дає ще один спосіб визначити ККД на стенді.

Турбонаддув. Потужність двигуна обмежена масою повітря, що потрапляє в циліндри: без кисню паливо не згорить. Турбокомпресор використовує енергію відпрацьованих газів, яка інакше втрачається з вихлопом: газова турбіна обертає компресор, що нагнітає повітря у впускний колектор під тиском. Стиснене повітря нагрівається, і його густина падає, тому після компресора встановлюють інтеркулер. Завдяки наддуву двигун меншого робочого об'єму розвиває ту саму потужність, що й більший атмосферний, а втрати на тертя в ньому менші — так підвищується ефективний ККД.

Ключові формули

- ККД теплового двигуна: $\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1$
- ККД циклу Карно: $\eta_K = 1 - T_2/T_1$
- ККД циклу Отто: $\eta = 1 - 1/\varepsilon^{\gamma-1}$
- ККД циклу Дизеля: $\eta = 1 - (\rho^\gamma - 1)/(\gamma \cdot \varepsilon^{\gamma-1} \cdot (\rho - 1))$
- Ефективний ККД: $\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$; $\eta_e = 3600/(g_e \cdot q)$
- Годинна витрата палива: $G_p = g_e \cdot N_e$

Питання для самоконтролю

1. Чому навіть ідеальний тепловий двигун не може мати ККД 100 %? Який закон це забороняє?
2. Обчисліть термічний ККД циклу Отто для $\varepsilon = 9$ і $\varepsilon = 11$. Чому ступінь стиснення бензинових двигунів не підвищують до 18?
3. Дизель має питому витрату палива 210 г/(кВт·год). Обчисліть його ефективний ККД і порівняйте з бензиновим двигуном із витратою 270 г/(кВт·год).

ЛЕКЦІЯ 10

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, КОНВЕКЦІЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ДВИГУНА

План лекції

1. Механізми теплопередачі.
2. Тепловий баланс двигуна внутрішнього згоряння.
3. Система охолодження: фізичні функції елементів.
4. Охолоджувальні рідини. Кипіння під тиском. Наслідки перегріву.

1. Механізми теплопередачі

Теплопровідність — перенесення енергії через речовину без переміщення самої речовини. Тепловий потік через плоску стінку за законом Фур'є: $Q/t = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / \delta$, де λ — коефіцієнт теплопровідності, δ — товщина стінки. Метали добре проводять теплоту (алюміній близько 200, мідь близько 390, чавун близько 50 Вт/(м·К)), тому поршні й головки блока виготовляють з алюмінієвих сплавів, а радіатори — з алюмінію або міді. Шар накипу (λ близько 1–2 Вт/(м·К)) або масляних відкладень у сорочці охолодження товщиною 1 мм може погіршити тепловідведення так само, як кілька сантиметрів чавуну.

Конвекція — перенесення теплоти потоками рідини чи газу. Тепловий потік від стінки до теплоносія $Q/t = \alpha \cdot S \cdot \Delta T$, де α — коефіцієнт тепловіддачі, який різко зростає зі швидкістю потоку. Тому насос охолоджувальної рідини прокачує її через сорочку, а вентилятор і набігаючий потік обдувають радіатор. Вимушена конвекція ефективніша за природну в десятки разів.

Теплове випромінювання — перенесення енергії електромагнітними хвилями, яке не потребує середовища. Потужність випромінювання пропорційна четвертій степені абсолютної температури (закон Стефана — Больцмана). Розпечений випускний колектор і турбокомпресор інтенсивно випромінюють теплоту, тому поруч розташовані проводи, шланги й паливні трубки захищають відбивними екранами.

2. Тепловий баланс двигуна

Теплота, що виділилася під час згоряння палива, розподіляється приблизно так: корисна робота на колінчастому валу — 25–40 %; втрати з відпрацьованими газами — 30–40 %; теплота, відведена системою охолодження, — 20–30 %; тертя, випромінювання, неповнота згоряння — 5–10 %. Частина теплоти тертя також потрапляє в охолоджувальну рідину й мастило.

Тепловий баланс пояснює кілька практичних речей. Система охолодження має відвести потужність, співмірну з корисною потужністю двигуна: для двигуна потужністю 80 кВт це 50–70 кВт у форсованому режимі. Опалювач салону працює на «відходах» — теплоті, яку двигун і так мусить позбутися. Електромобіль, де ККД приводу близько 90 %, таких «відходів» не має, тому взимку опалення відчутно скорочує запас ходу.

3. Система охолодження

Задача системи охолодження — не «охолоджувати якомога сильніше», а підтримувати оптимальну температуру (для більшості двигунів 85–105 °С). Переохолоджений двигун має підвищене зношування, гірше випаровування палива, конденсацію води й палива на стінках циліндрів і розрідження мастила.

Радіатор — теплообмінник, де теплота від рідини через тонкі стінки трубок і ребра передається повітрю. Велика площа ребер компенсує малий коефіцієнт тепловіддачі до повітря.

Термостат — клапан, який керує потоком рідини залежно від її температури. Його чутливий елемент — циліндр із твердим наповнювачем (воском), що під час плавлення значно розширюється і відкриває клапан. Холодний двигун прогрівається за «малим колом», без радіатора; після досягнення 80–90 °С термостат спрямовує рідину через радіатор.

Вентилятор вмикається, коли швидкісного напору повітря недостатньо — у заторі, на малій швидкості, у спеку. Витрату рідини через систему можна оцінити з теплового балансу: $Q/t = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta t$. Якщо відвести 30 кВт за різниці температур рідини на вході й виході радіатора 8 К, потрібно близько $30\,000 / (3500 \cdot 8) \approx 1,1$ кг/с — це й забезпечує насос.

4. Охолоджувальні рідини. Кипіння під тиском. Перегрів

Чиста вода замерзає за 0 °С з розширенням, яке розриває блок і радіатор, і спричиняє корозію. Тому використовують розчини етилен- або пропіленгліколю з присадками: вони замерзають за -30...-40 °С, мають вищу температуру кипіння і захищають від корозії та накипу.

Температура кипіння рідини залежить від тиску: що вищий тиск, то вища температура кипіння. Кришка розширювального бачка має клапан, що утримує в системі надлишковий тиск близько 1,0–1,5 бар. За такого тиску рідина кипить за 115–125 °С, а не за 105–108 °С, як за атмосферного. Звідси два важливі правила. Кришку гарячого двигуна не відкривають: тиск різко падає, перегріта рідина миттєво закипає й викидається назовні, спричиняючи опіки. Несправний клапан кришки знижує температуру кипіння і призводить до «беззвучного» перегріву.

Наслідки перегріву: кипіння рідини й утворення парових пробок, які різко погіршують тепловідведення (тепловіддача до пари значно гірша, ніж до рідини); втрата в'язкості мастила й розрив масляної плівки; заклинювання поршнів через теплове розширення; деформація головки блока і пробій прокладки. Типові причини перегріву мають чіткий фізичний зміст: заклинений у закритому положенні термостат, несправний вентилятор, забруднені зовні соти радіатора (погана тепловіддача до повітря), накип усередині (погана теплопровідність), низький рівень рідини.

Ключові формули

- Теплопровідність (закон Фур'є): $Q/t = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / \delta$
- Конвекція: $Q/t = \alpha \cdot S \cdot \Delta T$
- Випромінювання (закон Стефана — Больцмана): $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)
- Тепловий потік, що переносить теплоносії: $Q/t = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta t$
- Тепловий баланс двигуна: $Q_{\text{пал}} = N_e + Q_{\text{вг}} + Q_{\text{охол}} + Q_{\text{інші}}$

Питання для самоконтролю

1. Чому накип товщиною 1 мм у сорочці охолодження може спричинити перегрів двигуна, хоча система справна?
2. Навіщо систему охолодження роблять герметичною і під тиском? Чому не можна відкривати кришку бачка на гарячому двигуні?
3. Двигун у заторі перегрівається, а на трасі працює нормально. Які фізичні причини ви перевірите в першу чергу?

ЛЕКЦІЯ 11

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ. В'ЯЗКІСТЬ РІДИН. ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА

План лекції

1. Плавлення, випаровування, кипіння, конденсація. Парові пробки.
2. Теплове розширення тіл. Теплові зазори.
3. Поверхневий натяг, змочування, капілярні явища. Розпилювання палива.
4. В'язкість рідин. Моторні мастила. Режими мащення.

1. Фазові переходи

Фазовий перехід — перехід речовини з одного агрегатного стану в інший. Під час плавлення і кипіння теплота поглинається без підвищення температури: вона витрачається на руйнування зв'язків між частинками. Питома теплота пароутворення води — 2,26 МДж/кг, у кілька разів більша, ніж потрібно для нагрівання тієї ж води від 0 до 100 °С.

Випаровування відбувається з поверхні за будь-якої температури й супроводжується охолодженням рідини. Кипіння — пароутворення в усьому об'ємі, яке настає, коли тиск насиченої пари зрівнюється із зовнішнім тиском. Тому температура кипіння залежить від тиску.

Випаровуваність палива. Бензин має бути досить леткий, щоб двигун легко заводився на холоді, і водночас не надто леткий, щоб у спеку не закипав у паливній магістралі. Бульбашки пари утворюють парові пробки: паровий об'єм стискається, насос не може створити тиск, і двигун глухне. Через це літні й зимові сорти бензину мають різний фракційний склад, а паливний насос сучасних систем розташовують у баку й створюють підвищений тиск у магістралі.

Гальмівна рідина. Гігроскопічні гальмівні рідини на основі гліколів поглинають вологу з повітря. Суха рідина DOT 4 кипить за температури понад 230 °С, а зволожена лише 3 % води — близько 155 °С. Під час тривалого гальмування на спуску рідина в колісних циліндрах закипає, утворюється пара, яка стискається, і педаль «провалюється». Тому гальмівну рідину замінюють за регламентом, а стан перевіряють приладом, що вимірює температуру кипіння або вміст води.

Конденсація — перехід пари в рідину з виділенням теплоти. Вона пояснює запотівання скла в салоні (кондиціонер осушує повітря, конденсуючи вологу на холодному випарнику) і появу води у вихлопній системі на холодному двигуні.

2. Теплове розширення

Під час нагрівання більшість тіл розширюється. Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t$, де α — температурний коефіцієнт лінійного розширення: для сталі близько $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для чавуну близько $11 \cdot 10^{-6}$, для алюмінієвих сплавів близько $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Об'ємне розширення: $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta t$, для твердих тіл $\beta \approx 3\alpha$.

Алюмінієвий поршень діаметром 80 мм, нагрівшись на 150 К, збільшує діаметр на $23 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 150 \approx 0,28 \text{ мм}$, тоді як чавунна гільза нагрівається менше й розширюється слабше. Тому між поршнем і циліндром у холодному стані передбачають монтажний зазор, а поршень роблять овальним і конусним. Замалий зазор — заклинювання на прогрітому двигуні, занадто великий — стук і витрата мастила на холодному.

Зазор у приводі клапанів (якщо немає гідрокомпенсаторів) потрібен з тієї самої причини: стрижень клапана подовжується під час нагрівання. Без зазору клапан на гарячому двигуні не закриється щільно й прогорить. Регулюють зазор на холодному двигуні за паспортними даними.

Об'ємне розширення рідин компенсують розширювальним бачком системи охолодження і вільним об'ємом у паливному баку. Теплове розширення використовують і в технології: гарячу посадку вінця маховика, запресування втулок з нагріванням корпусу чи охолодженням деталі.

3. Поверхневі явища

Молекули на поверхні рідини притягуються лише «всередину», тому поверхня поводить як натягнута плівка. Поверхневий натяг характеризують коефіцієнтом σ — силою на одиницю довжини межі поверхні.

Змочування визначається співвідношенням сил притягання між молекулами рідини та рідини і твердого тіла. Мастило добре змочує метал і розтікається тонкою плівкою — це необхідна умова мащення. Вода погано змочує поверхню скла, обробленого гідрофобним покриттям, і скочується краплями.

Капілярні явища — підняття або опускання рідини у вузьких каналах. Капілярна дія пояснює просочування рідин через мікропори ущільнень, рух мастила в зазорах, «повзучість» електроліту по клемх акумулятора.

Розпилювання палива. Щоб паливо швидко випарувалося й згоріло, його треба розбити на дрібні краплі. Поверхневий натяг протидіє дробленню: що менша крапля, то більший тиск усередині неї потрібно подолати. Тому тиск упорскування в сучасних дизелях з акумуляторною системою Common Rail сягає 1600–2500 бар, а в бензинових системах безпосереднього впорскування — 100–350 бар. Закоксовані форсунки дають «струмінь» замість туману, що погіршує згоряння, підвищує димність і витрату палива.

4. В'язкість. Моторні мастила

В'язкість — внутрішнє тертя між шарами рідини, що рухаються з різними швидкостями. Сила в'язкого тертя $F = \eta \cdot S \cdot \Delta v / \Delta y$, де η — динамічна в'язкість, Па·с. У техніці часто використовують кінематичну в'язкість $\nu = \eta / \rho$, мм²/с.

В'язкість рідин різко зменшується з підвищенням температури. Холодне мастило густе: двигун важко прокрутити, мастило повільно доходить до третєвих пар, і більша частина зношування припадає на перші секунди після холодного пуску. Гаряче мастило рідке: плівка між вкладишем і шийкою вала може стати надто тонкою.

Класифікація SAE описує в'язкісно-температурні властивості мастила. У позначенні 5W-30 перша частина з літерою W указує на поведінку на холоді (що менше число, то за нижчої температури забезпечується пуск і прокачування), друга — на в'язкість за робочої температури 100 °C. Індекс в'язкості показує, наскільки слабко в'язкість змінюється з температурою; всесезонні мастила мають високий індекс завдяки загущувальним присадкам.

Режими мащення. За гідродинамічного мащення вал «спливає» на клині мастила, і поверхні не контактують — так працюють корінні й шатунні підшипники в нормальному режимі; для цього потрібні достатні в'язкість, тиск мастила й частота обертання. За граничного мащення плівка має товщину кількох молекул, і навантаження сприймають

присадки — так працюють кулачки розподільного вала й поршневі кільця у мертвих точках. Падіння тиску мастила або розрідження його паливом переводить підшипники в граничний режим, що швидко закінчується задиром.

Ключові формули

- Тепло фазового переходу: $Q = L \cdot m$ (пароутворення); $Q = \lambda \cdot m$ (плавлення)
- Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t$; об'ємне: $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta t$, $\beta \approx 3\alpha$
- Сила поверхневого натягу: $F = \sigma \cdot l$
- Сила в'язкого тертя: $F = \eta \cdot S \cdot \Delta v / \Delta y$
- Кінематична в'язкість: $\nu = \eta / \rho$

Питання для самоконтролю

1. Чому гальмівну рідину замінюють за регламентом, навіть якщо витоків немає? Поясніть через фазовий перехід.
2. Сталевий вал завдовжки 0,5 м нагрівся на 80 К. На скільки він подовжився? Чому підшипники валів коробок передач і двигунів мають осьовий люфт?
3. Що означає маркування мастила 10W-40? Чому найбільше зношування двигуна припадає на холодний пуск?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 1 проводиться після завершення модуля II й охоплює матеріал лекцій 1–11.

МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

6 лекцій, 12 годин

Навчальним планом (120 кредитів ЄКТС) дисципліну «Електротехніка та електроніка» не передбачено. Тому модуль III є єдиною електротехнічною базою перед вивченням дисциплін «Електрообладнання автомобілів», «Електронні та мікропроцесорні системи керування автомобілів» і «Комп'ютерні технології та діагностика автомобілів» і має розширений обсяг.

ЛЕКЦІЯ 12

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАРЯД, НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ. ЄМНІСТЬ. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ

План лекції

1. Електричний заряд. Закон збереження заряду. Закон Кулона.
2. Електричне поле. Напруженість, потенціал, напруга.
3. Провідники й діелектрики в електричному полі.
4. Електроємність. Конденсатори. Енергія електричного поля.

1. Електричний заряд. Закон Кулона

Електричний заряд — властивість частинок вступати в електромагнітну взаємодію. Існують заряди двох знаків; однойменні відштовхуються, різнойменні притягуються. Найменший вільний заряд має електрон: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд тіла кратний e : тіло заряджене негативно, якщо має надлишок електронів, позитивно — якщо нестачу.

Закон збереження заряду: у замкненій системі алгебраїчна сума зарядів стала. Під час електризації тертям заряди не створюються, а перерозподіляються між тілами.

Закон Кулона: сила взаємодії двох точкових зарядів $F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$, де $k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл². У середовищі сила зменшується в ϵ разів (ϵ — діелектрична проникність).

2. Електричне поле

Заряд створює навколо себе електричне поле, яке діє на інші заряди. Силу характеристику поля — напруженість — визначають як силу, що діє на одиничний позитивний заряд: $E = F/q$, одиниця В/м.

Поле виконує роботу, переміщуючи заряд. Енергетичну характеристику — потенціал ϕ — визначають як потенціальну енергію одиничного заряду. Різниця потенціалів між двома точками — напруга: $U = A/q$. Саме напругу вимірює вольтметр. Для однорідного поля $E = U/d$.

Потенціал визначається відносно вибраного нуля. В автомобілі за нуль беруть «масу» — кузов, з'єднаний з негативною клемою акумулятора. Усі напруги в бортовій мережі вимірюють відносно маси, тому окислений або ослаблений провід маси — одна з найчастіших причин дивних несправностей: «нуль» окремого вузла зміщується, і датчики передають хибні сигнали.

3. Провідники і діелектрики

У провідниках (метали, електроліти) є вільні заряди. У статичному стані поле всередині провідника дорівнює нулю, а заряди розміщуються на поверхні, скупчуючись на вістрях. На цьому ґрунтується екранування: металевий кузов захищає салон від зовнішніх

полів, а екранована оплітка проводів датчиків (датчик детонації, кисневий датчик) захищає слабкі сигнали від перешкод системи запалювання.

У діелектриках вільних зарядів майже немає. У зовнішньому полі вони поляризуються, що послаблює поле всередині. За надто сильного поля діелектрик пробивається: у ньому утворюється провідний канал. Ізоляція високовольтних проводів запалювання і ковпачків свічок розрахована на напруженість, що виникає під час іскроутворення. Тріщини, бруд і волога на ізоляції створюють шляхи для витоку струму — пропуски запалювання в сиру погоду.

Статична електрика. Під час руху палива по шлангу і роздавальному пістолету, під час тертя одягу об сидіння накопичуються заряди. Іскра розряду в середовищі пари бензину може спричинити займання. Тому паливозаправні колонки й паливовози заземлюють, а бензовози мають заземлювальний ланцюг чи трос.

4. Електроємність. Конденсатори

Електроємність $C = q/U$, одиниця фарад (на практиці мкФ, нФ, пФ). Плоский конденсатор: $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S/d$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Ємність зростає зі збільшенням площі обкладок і зменшенням відстані між ними, а також із заміною діелектрика на такий, що має більшу проникність.

Паралельне з'єднання: $C = C_1 + C_2 + \dots$; послідовне: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$ Енергія зарядженого конденсатора $W = CU^2/2$.

Конденсатори в автомобілі. Конденсатор, увімкнений паралельно контактам переривника класичної системи запалювання, зменшував іскріння й обгорання контактів. Конденсатори в блоках керування та генераторі згладжують пульсації напруги й поглинають перешкоди. Від ємності залежить робота ємнісних датчиків: датчик рівня палива ємнісного типу, датчик дощу деяких конструкцій, датчики вологості й присутності пасажирів. Суперконденсатори (іоністори) з ємністю в сотні фарад застосовують у системах «старт-стоп» і в пускових пристроях для підтримки напруги в момент пуску.

Приклад. Конденсатор ємністю 0,22 мкФ заряджено до 300 В. Енергія $W = 0,22 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^4 / 2 \approx 10$ мДж — достатньо для відчутного удару струмом під час дотику до виводів неувімкненого блока. Конденсатори з великою ємністю після вимкнення живлення розряджають перед ремонтом.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 q_2 / (\varepsilon r^2)$, $k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл²
- Напруженість: $E = F/q$; однорідне поле: $E = U/d$
- Напруга: $U = A/q$
- Ємність: $C = q/U$; плоский конденсатор: $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S/d$
- З'єднання: паралельне $C = C_1 + C_2$; послідовне $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$
- Енергія конденсатора: $W = CU^2/2 = qU/2$

Питання для самоконтролю

1. Чому поганий контакт проводу маси може спричинити хибні покази датчиків і несправності, не пов'язані між собою?
2. Навіщо проводи датчика детонації та кисневого датчика екранують? Яка фізична властивість провідника тут використовується?

3. Чому паливозаправні колонки та бензовози заземлюють?

ЛЕКЦІЯ 13

ПОСТІЙНИЙ СТРУМ. ЗАКОН ОМА. ОПІР. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

План лекції

1. Електричний струм. Сила струму. Умови існування струму.
2. Закон Ома для ділянки кола. Опір провідника.
3. З'єднання провідників. ЕРС. Закон Ома для повного кола.
4. Робота і потужність струму. Закон Джоуля — Ленца. Бортова мережа автомобіля.

1. Електричний струм

Електричний струм — упорядкований рух заряджених частинок. У металах це електрони, в електролітах — іони обох знаків. За напрямок струму умовно прийнято напрямок руху позитивних зарядів — від «+» до «-» у зовнішньому колі.

Сила струму $I = q/t$ — заряд, що проходить через переріз провідника за одиницю часу, одиниця ампер. Для існування струму потрібні вільні заряди, замкнене коло і джерело, яке підтримує різницю потенціалів. В автомобілі джерела — акумуляторна батарея та генератор.

Типові значення струмів: лампа габаритного вогню — 0,4 А, фара ближнього світла (55 Вт) — близько 4,6 А, обігрівач заднього скла — 10–15 А, вентилятор радіатора — 10–25 А, стартер легкового автомобіля під час пуску — 150–300 А, дизельного — до 600 А і більше.

2. Закон Ома. Опір

Закон Ома для ділянки кола: $I = U/R$. Опір провідника $R = \rho \cdot l/S$, де ρ — питомий опір. Для міді $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, для алюмінію $0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Опір металів зростає з температурою: $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$, для міді $\alpha \approx 0,004 \text{ К}^{-1}$. Нитка розжарення лампи на холоді має опір у 10–15 разів менший, ніж у робочому стані, тому лампи найчастіше перегорають саме в момент увімкнення.

Залежність опору від температури використовують у датчиках температури. Платиновий або нікелевий терморезистор має позитивний коефіцієнт; напівпровідниковий терморезистор (NTC), що стоїть у датчиках температури охолоджувальної рідини й повітря, — негативний: з нагріванням його опір падає. Перевірка датчика мультиметром — це вимірювання опору й порівняння з табличною залежністю від температури.

3. З'єднання провідників. ЕРС. Закон Ома для повного кола

Послідовне з'єднання: струм однаковий, напруги додаються, $R = R_1 + R_2 + \dots$. Паралельне з'єднання: напруга однакова, струми додаються, $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$. Усі споживачі бортової мережі ввімкнені паралельно — кожен отримує повну напругу мережі й працює незалежно від інших. Послідовно з споживачем вмикають вимикачі, реле, запобіжники, а також резистори, наприклад для ступеневого регулювання частоти обертання вентилятора опалювача.

Електрорушійна сила джерела E — робота сторонніх сил із переміщення одиничного заряду всередині джерела. Будь-яке реальне джерело має внутрішній опір r . Закон Ома для повного кола: $I = E/(R + r)$. Напруга на затискачах джерела $U = E - I \cdot r$ менша за ЕРС на спад

напруги всередині джерела. Що більший струм, то сильніше «просідає» напруга. Акумулятор, у якого без навантаження 12,6 В, під час пуску двигуна може показати 9–10 В — це нормально; а падіння нижче 9 В свідчить про розряд або зношення батареї.

4. Робота, потужність, закон Джоуля — Ленца. Бортова мережа

Робота струму $A = U \cdot I \cdot t$, потужність $P = U \cdot I$. Кількість теплоти, що виділяється в провіднику (закон Джоуля — Ленца): $Q = I^2 \cdot R \cdot t$.

Спад напруги в проводах. Номінальна напруга бортової мережі легкового автомобіля 12 В (за працюючого генератора 13,8–14,5 В), вантажівок і автобусів — 24 В. Мідний провід перерізом 1,5 мм² і сумарною довжиною 4 м (до споживача і назад) має опір $0,0175 \cdot 4/1,5 \approx 0,047$ Ом. За струму 10 А спад напруги становить 0,47 В — майже 4 % напруги мережі, а втрати потужності в проводі — близько 5 Вт. Тому переріз проводів вибирають за струмом споживача й довжиною лінії, а для стартера використовують проводи перерізом 16–35 мм² і більше. У 24-вольтовій мережі за тієї самої потужності струм удвічі менший, а втрати в проводах — учетверо менші; це одна з причин переходу вантажівок на 24 В.

Перехідний опір контактів. Окислена клемма акумулятора з опором лише 0,01 Ом за пускового струму 200 А «з'їдає» 2 В напруги і розсіює 400 Вт теплоти. Стартер крутить мляво, а клемма нагрівається й може оплавитися. Тому очищення й затягування клем — не косметична операція.

Запобіжники захищають проводку від перегрівання. Плавка вставка — провідник, розрахований так, щоб розплавитися за струму, небезпечного для проводки. Замінити перегорілий запобіжник на потужніший чи «жучок» означає прибрати захист: у разі короткого замикання перегріється й займеться провід.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q/t$
- Закон Ома для ділянки: $I = U/R$
- Опір провідника: $R = \rho \cdot l/S$; $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$
- Послідовне з'єднання: $R = R_1 + R_2$; паралельне: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$
- Закон Ома для повного кола: $I = E/(R + r)$; $U = E - I \cdot r$
- Потужність: $P = U \cdot I = I^2 R = U^2/R$; закон Джоуля — Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$

Питання для самоконтролю

1. Чому всі споживачі бортової мережі ввімкнено паралельно?
2. Обчисліть струм і опір нитки розжарення лампи 21 Вт у мережі 12 В. Чому холодна лампа в момент увімкнення споживає значно більший струм?
3. Клемма акумулятора має перехідний опір 0,015 Ом. Яка потужність виділяється на ній за пускового струму 180 А і чим це загрожує?

ЛЕКЦІЯ 14

СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ І НАПІВПРОВІДНИКАХ. ЕЛЕКТРОЛІЗ. АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

План лекції

1. Електропровідність електролітів. Електроліз. Закони Фарадея.

2. Свинцево-кислотний акумулятор: будова, процеси, характеристики.
3. Провідність напівпровідників. Електронно-дірковий перехід.
4. Напівпровідникові прилади в автомобілі. Тягові батареї (оглядово).

1. Електроліти. Електроліз

Електроліти — розчини і розплави кислот, лугів, солей. Під час розчинення молекули розпадаються на іони (електролітична дисоціація), і струм в електроліті — це зустрічний рух позитивних і негативних іонів.

Електроліз — виділення речовин на електродах під час проходження струму через електроліт. Перший закон Фарадея: маса речовини, що виділилася, пропорційна заряду: $m = k \cdot I \cdot t$, де k — електрохімічний еквівалент. Електроліз застосовують для гальванічних покриттів (хромування, цинкування, нікелювання деталей), електрохімічного очищення, анодування алюмінію. Електрохімічні процеси пояснюють і корозію: контакт різнорідних металів у присутності вологи з солями утворює гальванічну пару, в якій руйнується активніший метал. Так кородують сталеві деталі в місцях контакту з алюмінієм, особливо взимку, коли на дорогах сіль.

2. Свинцево-кислотний акумулятор

Акумулятор — хімічне джерело струму багаторазової дії, яке під час заряджання перетворює електричну енергію на хімічну, а під час розряджання — навпаки. Стартерна батарея складається з шести послідовно з'єднаних банок. Позитивні пластини містять діоксид свинцю PbO_2 , негативні — губчастий свинець Pb , електроліт — розчин сірчаної кислоти.

Під час розряджання на обох електродах утворюється сульфат свинцю, а кислота витрачається з утворенням води: $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$. Під час заряджання реакція йде у зворотному напрямку. Звідси зв'язок густини електроліту зі ступенем зарядженості: у повністю зарядженій батареї густина близько $1,27\text{--}1,28\text{ г/см}^3$, у розрядженій — близько $1,10\text{--}1,15\text{ г/см}^3$. Розряджений електроліт — майже вода, і на морозі він замерзає, розриваючи корпус. Заряджена батарея не замерзає до $-50\text{ }^\circ\text{C}$ і нижче.

ЕРС однієї банки близько $2,1\text{ В}$, батареї — $12,6\text{--}12,8\text{ В}$ у зарядженому стані. Напруга спокою $12,4\text{ В}$ відповідає зарядженості близько 75% , $12,2\text{ В}$ — близько 50% .

Ємність батареї — заряд, який вона віддає до допустимого розряду: $C_b = I \cdot t$, указується в ампер-годинах за 20-годинного режиму розряду. Батарея $60\text{ А} \cdot \text{год}$ здатна 20 годин віддавати 3 А . За більшого струму фактична ємність менша. Для стартерної батареї важливий ще й струм холодного прокручування — найбільший струм, який вона віддає на морозі, зберігаючи достатню напругу.

Внутрішній опір заряджених стартерних батарей — кілька тисячних ома, але на холоді він зростає: електроліт стає в'язким, реакції сповільнюються. Нехай $E = 12,6\text{ В}$, опір кола стартера $0,04\text{ Ом}$. За $r = 0,01\text{ Ом}$ пусковий струм $12,6/0,05 \approx 250\text{ А}$, напруга на затискачах $10,1\text{ В}$. На морозі, коли $r = 0,02\text{ Ом}$, струм падає до 210 А , напруга — до $8,4\text{ В}$: стартер крутить повільніше, а блок керування може «перезавантажуватися». Холодному двигуну при цьому потрібно більше енергії, бо загусле мастило.

Наприкінці заряджання струм іде на розкладання води на водень і кисень. Суміш водню з повітрям вибухонебезпечна. Тому акумулятори заряджають у провітрюваному

приміщенні, не допускають іскріння біля батареї, клеми під час заряджання не від'єднують і не під'єднують під струмом.

3. Напівпровідники. p–n-перехід

Напівпровідники (кремній, германій) за провідністю займають проміжне положення між провідниками й діелектриками, а їхня провідність різко зростає з нагріванням і освітленням. Власна провідність зумовлена електронами, що звільнилися з ковалентних зв'язків, і «дірками» — вакантними місцями, які поводяться як позитивні заряди.

Домішкова провідність створюється введенням домішок: п'ятивалентні домішки дають надлишок електронів (n-тип), тривалентні — надлишок дірок (p-тип). На межі p- і n-областей утворюється електронно-дірковий перехід із запірним шаром. Якщо «+» джерела подано на p-область (пряме ввімкнення), перехід відкритий і проводить струм; за зворотного ввімкнення струм практично відсутній. Це одностороння провідність — основа роботи діода.

4. Напівпровідникові прилади в автомобілі

Діоди: випрямляч генератора (діодний міст із шести або більше діодів), захист блоків керування від переполюсування. Стабілітрони обмежують напругу в колах живлення електроніки.

Транзистор — прилад із двома переходами, у якому малий керувальний струм (або напруга на затворі польового транзистора) керує великим струмом у головному колі. У блоках керування транзистори працюють як електронні ключі: вмикають форсунки, котушки запалювання, реле, регулюють струм збудження генератора.

Світлодіоди перетворюють електричну енергію на світло з високою ефективністю; на них зараз будують фари, ліхтарі, освітлення панелей.

Напівпровідникові датчики: терморезистори (температура рідини, повітря, мастила); фоторезистори й фотодіоди (датчик освітленості для автоматичного ввімкнення фар); тензорезистори, опір яких змінюється під час деформації (датчики абсолютного тиску у впускному колекторі, датчики тиску в шинах); п'єзоелектричні елементи (датчик детонації).

Тягові батареї електромобілів (оглядово). Літій-іонні елементи мають напругу 3,6–3,7 В і вдвічі-втричі більшу питому енергію, ніж свинцево-кислотні. Сотні елементів з'єднують послідовно й паралельно в батарею напругою 400 або 800 В. Такі напруги смертельно небезпечні; роботи з високовольтними системами гібридів та електромобілів (помаранчеві проводи) дозволені лише спеціально навченому персоналу із застосуванням засобів захисту.

Ключові формули

- Закон Фарадея для електролізу: $m = k \cdot I \cdot t$
- Струмоутворювальна реакція: $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- Ємність акумулятора: $C_b = I \cdot t$ (А·год)
- Напруга на затискачах під навантаженням: $U = E - I \cdot r$
- Пусковий струм: $I = E / (R_{ст} + r)$

Питання для самоконтролю

1. Чому розряджений акумулятор може замерзнути на морозі, а заряджений — ні? Поясніть через хімічну реакцію розрядження.

2. ЕРС батареї 12,7 В, внутрішній опір 0,012 Ом, опір кола стартера 0,035 Ом. Знайдіть пусковий струм і напругу на затискачах.

3. Яку функцію виконує транзистор у колі керування форсункою? Чому малий струм блока керування може вмикати значно більший струм?

ЛЕКЦІЯ 15

МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ІНДУКЦІЯ. СИЛА АМПЕРА ТА СИЛА ЛОРЕНЦА

План лекції

1. Магнітне поле струму. Магнітна індукція. Магнітний потік.
2. Сила Ампера. Сила Лоренца. Ефект Холла.
3. Магнітні властивості речовин. Електромагніт.
4. Реле та електромагнітні виконавчі механізми автомобіля.

1. Магнітне поле струму

Навколо провідника зі струмом і навколо постійного магніту існує магнітне поле. Його виявляють за дією на магнітну стрілку та на провідник зі струмом. Напрямок ліній магнітного поля прямого провідника визначають правилом свердлика (правого гвинта).

Силу характеристику поля — магнітну індукцію B — вимірюють у теслах. Магнітний потік через контур площею S : $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$, одиниця вебер. Поле котушки зі струмом (соленоїда) всередині практично однорідне, а його індукція пропорційна кількості витків на одиницю довжини і силі струму: $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I / l$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Тому для отримання сильного поля роблять багато витків і вставляють сталеве осердя.

2. Сила Ампера. Сила Лоренца. Ефект Холла

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера: $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$. Її напрямки визначають правилом лівої руки. Сила Ампера, що діє на провідники обмотки якоря, створює крутий момент у кожному електродвигуні автомобіля — від стартера до двигунів склоочисника, склопідіймачів, вентиляторів, насосів.

На заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$. Вона перпендикулярна швидкості, тому змінює напрямки руху частинки, але не модуль швидкості.

Ефект Холла. Якщо пластинку напівпровідника, по якій тече струм, помістити в магнітне поле, перпендикулярне до неї, сила Лоренца відхиляє носії заряду до одного з країв. Між краями виникає напруга Холла, пропорційна індукції поля. Датчики Холла реагують на наявність магнітного поля навіть за нерухомого об'єкта, дають чіткий прямокутний сигнал і працюють від нульової швидкості. Їх використовують як датчики положення розподільного вала, активні датчики частоти обертання коліс систем АБС, датчики положення педалі, датчики струму в системах керування акумулятором.

3. Магнітні властивості речовин

Речовини в магнітному полі намагнічуються. Діамагнетики трохи послаблюють поле, парамагнетики трохи посилюють, феромагнетики (залізо, нікель, кобальт, їхні сплави) посилюють його в сотні й тисячі разів. Феромагнетики мають петлю гістерезису: після зняття зовнішнього поля частина намагніченості зберігається. Магнітом'які матеріали (електротехнічна сталь) легко перемагнічуються і використовуються в осердях котушок,

реле, трансформаторів. Магнітотверді матеріали утримують намагніченість — з них роблять постійні магніти електродвигунів склоочисників, вентиляторів, стартерів з постійними магнітами. Під час нагрівання вище певної температури (точка Кюрі) феромагнетик втрачає феромагнітні властивості.

Електромагніт — котушка зі сталевим осердям. Його поле створюється лише за наявності струму й регулюється силою струму. Це дає змогу електрично керувати механічним рухом.

4. Реле та електромагнітні виконавчі механізми

Реле — електромагнітний вимикач. Малий струм в обмотці (0,1–0,2 А) притягує якір і замикає контакти, через які тече значно більший струм. Реле розвантажують вимикачі на панелі від великих струмів і дають змогу розмістити силові контакти поблизу споживача, скоротивши довжину товстих проводів.

Тягове реле стартера виконує дві функції: вводить шестерню стартера в зачеплення з вінцем маховика і замикає силові контакти, через які до стартера подається пусковий струм у сотні ампер. Кладання без обертання стартера найчастіше означає, що обмотка реле спрацювала, але через обгорілі контакти чи розряджену батарею силового струму недостатньо.

Електромагнітна форсунка — клапан, що відкривається під дією електромагніта на час імпульсу керування. Кількість уприснутого палива пропорційна тривалості імпульсу за сталого перепаду тиску. Електромагнітні клапани (соленоїди) керують перемиканням в автоматичних коробках, продуванням адсорбера, рециркуляцією газів, фазами газорозподілу, блокуванням диференціала.

Ключові формули

- Магнітний потік: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$
- Індукція в котушці: $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I / l$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
- Сила Ампера: $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$
- Сила Лоренца: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$
- Момент сил Ампера, що діє на рамку зі струмом: $M = N \cdot B \cdot I \cdot S \cdot \sin \alpha$

Питання для самоконтролю

1. Навіщо в колі фар і стартера використовують реле, якщо їх можна ввімкнути безпосередньо вимикачем?
2. Чим датчик Холла відрізняється від індуктивного датчика за принципом дії? Чому він дає сигнал навіть за нерухомого вала?
3. Провідник завдовжки 0,1 м, по якому тече струм 200 А, розміщено в магнітному полі з індукцією 0,8 Тл перпендикулярно до ліній поля. Обчисліть силу Ампера.

ЛЕКЦІЯ 16

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ. ГЕНЕРАТОР І СТАРТЕР

План лекції

1. Явище електромагнітної індукції. Закон Фарадея. Правило Ленца.
2. Вихрові струми. Самоіндукція. Енергія магнітного поля.

3. Генератор автомобіля: будова та регулювання напруги.
4. Стартер як електродвигун. Індуктивні датчики.

1. Електромагнітна індукція

Фарадей встановив: під час будь-якої зміни магнітного потоку, що пронизує замкнений контур, у ньому виникає електричний струм. Закон електромагнітної індукції: ЕРС індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку: $E = -N \cdot \Delta\Phi / \Delta t$, де N — кількість витків.

Правило Ленца: індукційний струм має такий напрямок, що його магнітне поле протидіє зміні потоку, яка його спричинила. Знак «мінус» у законі Фарадея — математичний запис цього правила. Правило Ленца — наслідок закону збереження енергії: щоб отримати електричну енергію від генератора, треба виконати механічну роботу проти сили, з якою індукційний струм гальмує ротор. Тому увімкнення потужних споживачів відчутно навантажує двигун на холостому ходу, і блок керування підвищує оберти.

2. Вихрові струми. Самоіндукція

У масивних провідниках, що рухаються в магнітному полі або перебувають у змінному полі, виникають замкнені вихрові струми. Вони нагрівають провідник і гальмують рух. Осердя трансформаторів, котушок і статорів збирають з тонких ізольованих пластин, щоб розірвати шляхи вихрових струмів. Водночас вихрові струми корисні: на них працюють електромагнітні сповільнювачі (ретардери) автобусів і вантажівок, де обертовий диск гальмується полем електромагнітів без тертя і зношування.

Самоіндукція — виникнення ЕРС у котушці під час зміни струму в ній самій: $E = -L \cdot \Delta I / \Delta t$, де L — індуктивність, генрі. Самоіндукція протидіє зміні струму: не дає струму миттєво зрости під час увімкнення і миттєво зникнути під час вимкнення. Під час розривання кола з котушкою ЕРС самоіндукції може в десятки разів перевищити напругу джерела. Це корисно в котушці запалювання і шкідливо в колах обмоток реле, електромагнітних клапанів і форсунок: сплеск напруги пошкоджує транзистори блока керування, тому такі обмотки шунтують захисними діодами або стабілітронами.

Енергія магнітного поля котушки $W = L \cdot I^2 / 2$ — саме ця енергія вивільняється під час розривання кола.

3. Генератор

Генератор змінного струму перетворює механічну енергію обертання на електричну. Ротор з обмоткою збудження, живленою через щітки й контактні кільця, створює обертове магнітне поле. У трифазній обмотці статора наводиться змінна ЕРС, яку трифазний діодний міст випрямляє в постійну напругу для бортової мережі.

ЕРС генератора пропорційна частоті обертання і магнітному потоку ротора. Частота обертання двигуна змінюється в кілька разів, а напруга мережі має бути сталою (13,8–14,5 В). Регулятор напруги змінює струм в обмотці збудження: з підвищенням напруги понад норму зменшує його, з пониженням — збільшує. Надто висока напруга «кип'ятить» акумулятор і скорочує строк служби ламп та електроніки, надто низька — не дозволяє зарядити батарею.

Від'єднувати акумулятор на працюючому двигуні не можна: батарея згладжує стрибки напруги, і без неї сплеск самоіндукції обмоток генератора може вивести з ладу діоди й електроніку.

4. Стартер. Індуктивні датчики

Стартер — електродвигун постійного струму. Сила Ампера, що діє на провідники якоря в полі статора, створює крутний момент. У стартерах традиційно застосовують послідовне збудження: той самий великий струм тече і через обмотку збудження, і через якір, тому пусковий момент максимальний саме за нерухомого якоря — коли потрібно зрушити колінчастий вал.

Обертовий якір сам стає генератором: у його обмотці індукується проти-ЕРС, спрямована проти напруги живлення за правилом Ленца. Тому струм стартера найбільший у момент увімкнення (якір стоїть, проти-ЕРС немає) і зменшується в міру розкручування. Якщо стартер «ледве крутить», струм лишається великим, а контакти й проводи перегріваються — тривалі безперервні спроби пуску неприпустимі.

Індуктивні датчики. Котушка з постійним магнітом стоїть навпроти зубчастого (задавального) диска. Коли зуб проходить повз датчик, магнітний потік змінюється, і в котушці наводиться імпульс ЕРС. Так працюють пасивні датчики частоти обертання коліс АБС і датчики положення колінчастого вала (задавальний диск типу «60–2» з пропуском двох зубів для визначення верхньої мертвої точки). Амплітуда і частота сигналу зростають зі швидкістю обертання; на дуже малій швидкості сигнал слабкий — тому для АБС поступово переходять на активні датчики Холла. Колесо, що обертається з частотою 13 об/с, з диском на 48 зубів дає сигнал частотою близько 630 Гц.

Ключові формули

- Закон електромагнітної індукції: $E = -N \cdot \Delta\Phi / \Delta t$
- ЕРС у провіднику, що рухається: $E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$
- ЕРС самоіндукції: $E = -L \cdot \Delta I / \Delta t$
- Енергія магнітного поля котушки: $W = L \cdot I^2 / 2$
- Частота сигналу індуктивного датчика: $f = z \cdot n$, де z — кількість зубів, n — частота обертання, об/с

Питання для самоконтролю

1. Чому ввімкнення обігріву скла й фар на холостому ході навантажує двигун? Який закон це пояснює?
2. Чому пусковий струм стартера найбільший саме в перший момент увімкнення?
3. Навіщо обмотки реле та електромагнітних клапанів шунтують діодами? Що станеться з транзистором блока керування без такого захисту?

ЛЕКЦІЯ 17

ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ВИПРЯМЛЕННЯ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМИ ЗАПАЛЮВАННЯ

План лекції

1. Змінний струм. Діючі значення. Опори в колі змінного струму.
2. Трансформатор. Коефіцієнт трансформації.

3. Випрямлення змінного струму.

4. Котушка запалювання як імпульсний трансформатор. Системи запалювання. Електробезпека.

1. Змінний струм

Змінний струм — струм, що періодично змінюється за значенням і напрямком. Під час рівномірного обертання рамки в магнітному полі ЕРС змінюється за гармонічним законом: $e = E_m \cdot \sin \omega t$. Частота промислової мережі 50 Гц; частота струму генератора автомобіля залежить від частоти обертання і кількості пар полюсів ротора і сягає сотень герців.

Діюче значення змінного струму — таке значення постійного струму, яке за той самий час виділяє в резисторі ту саму кількість теплоти: $I = I_m / \sqrt{2}$, $U = U_m / \sqrt{2}$. Мультиметр у режимі змінної напруги показує саме діюче значення; 230 В мережі відповідають амплітуді близько 325 В.

У колі змінного струму, крім активного опору R , діють реактивні опори. Індуктивний опір $X_L = \omega L$ зростає з частотою: котушка «не пропускає» швидкі зміни струму. Ємнісний опір $X_C = 1/(\omega C)$ спадає з частотою: конденсатор «пропускає» високочастотні перешкоди на масу. На цьому ґрунтуються фільтри перешкод у колах живлення радіоапаратури та блоків керування.

2. Трансформатор

Трансформатор — пристрій для перетворення змінної напруги. Дві обмотки розміщені на спільному осерді; змінний струм первинної обмотки створює змінний магнітний потік, який індукуює ЕРС у вторинній. Коефіцієнт трансформації $k = U_1/U_2 = N_1/N_2$. Якщо вторинна обмотка має більше витків, трансформатор підвищувальний.

Трансформатор не створює енергію: за нехтовно малих втрат $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$. Підвищуючи напругу, він у стільки ж разів зменшує струм. Трансформатор працює лише на змінному або переривчастому струмі: постійний струм не створює змінного потоку. Тому в котушці запалювання струм первинної обмотки обов'язково переривають.

Трансформатори в автомобільному сервісі: зарядні пристрої для акумуляторів (понижувальний трансформатор і випрямляч), зварювальні апарати, імпульсні перетворювачі в блоках живлення ксенонових ламп (підпалювальний імпульс понад 20 кВ).

3. Випрямлення

Для заряджання акумулятора і живлення бортових споживачів потрібен постійний струм. Однопівперіодний випрямляч з одним діодом пропускає лише одну півхвилю; двопівперіодний мостовий — обидві, спрямовуючи їх в один бік. Генератор автомобіля має трифазний мостовий випрямляч із шести силових діодів; випрямлена напруга має малі пульсації, які додатково згладжує акумулятор. Пробій одного діода моста проявляється зниженням зарядного струму, характерним виттям генератора і пульсаціями напруги, які видно на осцилографі.

4. Система запалювання

Для пробою іскрового проміжку свічки в стиснутій суміші потрібна напруга 10–20 кВ і більше: за законом Пашена напруга пробою зростає з тиском газу і зазором між

електродами. Бортова мережа дає 12 В. Котушка запалювання — імпульсний трансформатор, що розв'язує цю задачу в два етапи.

Накопичення енергії. Поки первинне коло замкнене, струм у первинній обмотці (N_1 — близько 100–200 витків) наростає, і в магнітному полі осердя накопичується енергія $W = L \cdot I^2 / 2$. Для $L = 4$ мГн і $I = 6$ А це близько 72 мДж. Час накопичення («час замкненого стану») задає блок керування: він має бути достатнім на високих обертах, але не надто довгим, щоб котушка не перегрівалася.

Переривання струму. У момент іскроутворення транзистор (раніше — контакти переривника) різко розриває первинне коло. Магнітний потік швидко зникає, і на первинній обмотці виникає ЕРС самоіндукції близько 200–400 В, а на вторинній обмотці (N_2 — 15 000–30 000 витків) — до 25–40 кВ. Напруга зростає доти, доки не проб'ється іскровий проміжок свічки; енергія поля перетворюється на енергію іскрового розряду.

Системи запалювання. Класична контактна система розривала струм механічним переривником, контакти обгорали, а сила первинного струму була обмежена. Електронна (безконтактна) система доручила цю функцію транзистору, а момент іскри — датчику (Холла або індуктивному). Сучасні системи без розподільника мають окрему котушку на кожну свічку або на пару циліндрів; котушка встановлюється безпосередньо на свічку, що усуває високовольтні проводи і втрати в них. Кут випередження запалювання розраховує блок керування.

Електробезпека. Напруга бортової мережі 12–24 В для людини безпечна, але струми короткого замикання в сотні ампер розжарюють інструмент, обручки й годинникові браслети до опіків. Під час робіт з електрообладнанням від'єднують мінусову клему батареї. Вторинне коло системи запалювання на працюючому двигуні небезпечне: розряд високої напруги через тіло спричиняє мимовільне скорочення м'язів і травми. Високовольтні системи гібридів і електромобілів становлять смертельну небезпеку і обслуговуються лише з допуском.

Ключові формули

- Миттєве значення ЕРС: $e = E_m \cdot \sin \omega t$; $\omega = 2\pi f$
- Діючі значення: $I = I_m / \sqrt{2}$; $U = U_m / \sqrt{2}$
- Індуктивний опір: $X_L = \omega L$; ємнісний: $X_C = 1/(\omega C)$
- Коефіцієнт трансформації: $k = U_1 / U_2 = N_1 / N_2$
- Баланс потужностей ідеального трансформатора: $U_1 I_1 = U_2 I_2$
- Енергія, накопичена котушкою запалювання: $W = L \cdot I^2 / 2$

Питання для самоконтролю

1. Чому трансформатор не працює на постійному струмі і як цю проблему розв'язано в котушці запалювання?
2. Первинна обмотка котушки має 150 витків, вторинна — 22 500. На первинній обмотці в момент переривання виникає 250 В. Оцініть напругу на вторинній обмотці.
3. Чому для пробою іскрового проміжку свічки в циліндрі потрібна значно вища напруга, ніж для такого самого проміжку на повітрі за атмосферного тиску?

МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ ТА ОПТИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 18

МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС. ХВИЛІ. ЗВУК ТА УЛЬТРАЗВУК

План лекції

1. Гармонічні коливання та їх характеристики. Пружинний маятник.
2. Вільні, згасаючі та вимушені коливання. Резонанс.
3. Підвіска автомобіля як коливальна система. Дисбаланс коліс.
4. Механічні хвилі. Звук і шум. Ультразвук у діагностиці та системах допомоги водієві.

1. Гармонічні коливання

Коливання — рухи, що повторюються через однакові проміжки часу. Найпростіші — гармонічні: $x = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$, де A — амплітуда (найбільше відхилення), T — період, $\nu = 1/T$ — частота (Гц), $\omega = 2\pi\nu$ — циклічна частота, φ_0 — початкова фаза.

Пружинний маятник — тіло масою m на пружині жорсткістю k . Його власна частота $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, період $T = 2\pi \cdot \sqrt{m/k}$. Що жорсткіша пружина і що легше тіло, то частіші коливання. Цікавий наслідок: період можна виразити через статичний прогин пружини $x = mg/k$: $T = 2\pi \cdot \sqrt{x/g}$. Автомобіль, що просів під вагою на 20 см, коливатиметься з частотою близько 1,1 Гц незалежно від того, яка саме в нього маса.

2. Згасаючі та вимушені коливання. Резонанс

Вільні коливання системи без тертя тривали б нескінченно. У реальних системах енергія витрачається на подолання опору, і коливання згасають. Вимушені коливання відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили і встановлюються з її частотою.

Резонанс — різке зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота зовнішньої сили наближається до власної частоти системи. За малого згасання резонансна амплітуда може бути дуже великою. Резонанс руйнує: вібрації на певних обертах двигуна призводять до втомних тріщин кронштейнів і вихлопної системи, розхитують кріплення. Його використовують і корисно: у датчику детонації п'єзоелемент налаштовано на частоти, характерні для детонаційних коливань.

Способи боротьби з резонансом: змінити власну частоту системи (жорсткість чи масу), збільшити згасання (демпфери), усунути збурювальну силу (балансування). Гасник крутильних коливань на передньому кінці колінчастого вала, двомасовий маховик, гумові подушки опор двигуна — приклади таких рішень.

3. Підвіска як коливальна система. Дисбаланс

Кузов на пружинах підвіски — коливальна система. Якщо на одне колесо припадає підресорена маса 350 кг, а жорсткість пружного елемента 30 кН/м, то $\omega_0 = \sqrt{(30\,000/350)} \approx 9,3$ рад/с, тобто $\nu \approx 1,5$ Гц. Людина найкраще переносить коливання з частотою 1–1,5 Гц, близькою до частоти кроку під час ходьби. Жорсткіша підвіска підвищує частоту — автомобіль керованіший, але менш комфортний.

Амортизатор — гідравлічний демпфер, що перетворює енергію коливань на теплоту в'язкого тертя рідини, яка протискається через дроселювальні отвори. Без амортизатора

кузов після кожної нерівності розгойдувався б довго, а на хвилястій дорозі наставав би резонанс, колесо відривалося б від дороги й втрачало зчеплення. Перевірка амортизаторів на вібростенді ґрунтується саме на вимірюванні того, як колесо притискається до платформи на резонансній частоті.

Дисбаланс колеса — нерівномірний розподіл маси відносно осі обертання. Незрівноважена маса m на радіусі r створює відцентрову силу $F = m \cdot \omega^2 \cdot r$, яка зростає з квадратом швидкості й змінює напрямок з частотою обертання колеса. На швидкості 95 км/год колесо радіусом 0,3 м обертається з частотою близько 14 Гц, що близько до власної частоти коливань неопідресореної маси колеса й рульового приводу. Тому кермо вібрує в певному діапазоні швидкостей, а за його межами вібрація зникає. Балансувальний верстат вимірює силу дисбалансу і вказує місце й масу балансувального тягарця.

4. Хвилі. Звук. Ультразвук

Механічна хвиля — поширення коливань у пружному середовищі. У поздовжніх хвилях частинки коливаються вздовж напрямку поширення, у поперечних — перпендикулярно. Довжина хвилі $\lambda = v/v$. Хвиля переносить енергію без перенесення речовини.

Звук — поздовжні хвилі частотою від 16–20 Гц до 20 кГц. Швидкість звуку в повітрі близько 340 м/с, у воді близько 1500 м/с, у сталі близько 5000 м/с. Гучність оцінюють рівнем звукового тиску в децибелах: $L = 10 \cdot \lg(I/I_0)$. Збільшення інтенсивності вдвічі додає 3 дБ, удесятеро — 10 дБ. У салоні легкового автомобіля на трасі 65–75 дБ; на робочих місцях у ремонтних цехах рівень шуму нормується, тривала дія шуму понад 80 дБ потребує засобів захисту органів слуху. Шумоізоляція салону поєднує масивні шари, що відбивають звук, і пористі матеріали, що поглинають його.

За звуком фахівець діагностує несправності: стук поршневих пальців, шатунних і корінних вкладишів, клапанів має характерні частоту й залежність від обертів. Стетоскоп механіка передає звук через металевий щуп, де він поширюється краще.

Ультразвук — пружні хвилі частотою понад 20 кГц. Ультразвукові датчики паркування (парктроніки) випромінюють імпульс частотою близько 40 кГц і вимірюють час повернення відбитого сигналу: відстань $s = v \cdot t/2$. Якщо ехо повернулося через 6 мс, перешкода на відстані $340 \cdot 0,006 / 2 \approx 1$ м. Бруд, лід або сніг на датчику змінюють його роботу. Ультразвукові товщиноміри вимірюють товщину металу кузова й рами з одного боку, ультразвукові дефектоскопи знаходять внутрішні тріщини у валах і зварних швах, а ультразвукові ванни очищують форсунки й дрібні деталі завдяки кавітації.

Ключові формули

- Гармонічні коливання: $x = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$; $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$
- Пружинний маятник: $T = 2\pi \cdot \sqrt{(m/k)}$; $\nu = (1/2\pi) \cdot \sqrt{(k/m)}$
- Через статичний прогин: $T = 2\pi \cdot \sqrt{(x/g)}$
- Сила дисбалансу: $F = m \cdot \omega^2 \cdot r$
- Довжина хвилі: $\lambda = v/\nu = v \cdot T$
- Рівень звуку: $L = 10 \cdot \lg(I/I_0)$, дБ
- Ехолокація: $s = v \cdot t/2$

Питання для самоконтролю

1. Підресорена маса на колесо 400 кг, жорсткість пружини 36 кН/м. Обчисліть власну частоту коливань кузова. Чи комфортна вона для людини?
2. Чому кермо вібрає лише в певному діапазоні швидкостей? Поясніть через резонанс.
3. Датчик паркування отримав відбитий сигнал через 3,5 мс. Яка відстань до перешкоди? Чому датчик, покритий шаром льоду, працює неправильно?

ЛЕКЦІЯ 19

ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ОПТИКА. СВІЛОТЕХНІЧНІ ВЕЛИЧИНИ. ФОТОЕФЕКТ

План лекції

1. Електромагнітні хвилі. Шкала електромагнітних хвиль. Радіосистеми автомобіля.
2. Відбивання і заломлення світла. Повне внутрішнє відбивання.
3. Оптика фар. Світлотехнічні величини. Джерела світла.
4. Поляризація. Квантові властивості світла. Фотоефект і фотодатчики.

1. Електромагнітні хвилі

Змінне електричне поле породжує змінне магнітне, а те — знову електричне. Так виникає електромагнітна хвиля, що поширюється у вакуумі зі швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Для неї $\lambda = c/\nu$.

Шкала електромагнітних хвиль охоплює радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське і гамма-випромінювання. Фізична природа в них однакова, а властивості різні через різну довжину хвилі.

Радіодіапазон в автомобілі: радіоприймач; брелоки центрального замка і системи безключового доступу (433 МГц, 868 МГц, 125 кГц для визначення наближення ключа); датчики тиску в шинах, що передають дані по радіоканалу; GPS-навігація (близько 1,6 ГГц, $\lambda \approx 19$ см); радар адаптивного круїз-контролю й систем контролю сліпих зон (76–81 ГГц, $\lambda \approx 4$ мм). Радар визначає відстань за часом повернення сигналу, а швидкість — за зміною частоти відбитої хвилі (ефект Доплера). Бруд, сніг і наклейки на місці радару порушують його роботу, а після ремонту бампера радар потребує калібрування.

Інфрачервоне випромінювання випромінюють усі нагріті тіла. Тепловізор виявляє перегріті вузли, нерівномірність прогрівання радіатора, несправні нитки обігріву скла. Ультрафіолетові лампи й флуоресцентні барвники застосовують для пошуку витоків холодоагенту кондиціонера та мастила.

2. Відбивання і заломлення світла

Закон відбивання: кут падіння дорівнює куту відбивання. Від гладкої поверхні світло відбивається дзеркально, від шорсткої — розсіюється. Мокрий асфальт уночі стає дзеркалом: світло фар відбивається вперед, а не назад до водія, і дорога виглядає темною, а зустрічні фари осліплюють сильніше.

Закон заломлення: $n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$, де n — показник заломлення (повітря 1,0, вода 1,33, скло 1,5). Під час переходу світла з оптично густішого середовища в менш густе за кутів падіння, більших за граничний ($\sin \alpha_0 = n_2/n_1$), світло повністю відбивається назад. Це

повне внутрішнє відбивання. На ньому ґрунтуються світловоди підсвічування панелей і оптичні волокна мультимедійних шин, а також датчик дощу: інфрачервоний промінь, що вводиться в лобове скло, багаторазово відбивається від зовнішньої поверхні скла й повертається на фотоприймач. Крапля води на склі змінює умову повного відбивання, частина світла виходить назовні, сигнал зменшується, і склоочисник вмикається.

3. Оптика фар і світлотехніка

Лінзи і дзеркала формують пучки світла. Якщо джерело розташоване у фокусі параболічного відбивача, відбиті промені йдуть паралельним пучком — дальнє світло. Для ближнього світла потрібний пучок із чіткою світлотіньовою межею, щоб не осліплювати зустрічних водіїв: джерело зміщують від фокуса та екранують частину відбивача (класичні фари) або формують межу проєкційною лінзою (лінзовані фари). Навіть невелике зміщення лампи чи неправильний кут нахилу фари змінює світлорозподіл, тому фари регулюють на спеціальному приладі за екраном з розміткою, а коректор нахилу фар компенсує навантаження автомобіля.

Світлотехнічні величини. Світловий потік Φ — потужність видимого випромінювання з урахуванням чутливості ока, люмен (лм). Сила світла I — потік в одиниці тілесного кута в певному напрямку, кандела (кд). Освітленість E — світловий потік на одиницю площі, люкс (лк). Від точкового джерела $E = I \cdot \cos \alpha / r^2$: освітленість спадає обернено пропорційно квадрату відстані. Фара з силою світла 20 000 кд на відстані 50 м створює освітленість 8 лк, а на 100 м — лише 2 лк. Яскравість характеризує, наскільки «сліпуче» виглядає поверхня; саме яскравість фар зустрічного автомобіля визначає осліплення.

Джерела світла та їхня світлова віддача (лм/Вт): лампа розжарювання — 10–15; галогенна — 20–25; ксенонова газорозрядна — 80–90; світлодіодна — 80–150 і більше. Висока ефективність світлодіодів зменшує навантаження на генератор і дає змогу гнучко керувати світлорозподілом (адаптивні матричні фари).

4. Поляризація. Фотоефект

Світло — поперечна хвиля. Природне світло неполяризоване; поляризатор пропускає коливання лише в одній площині. Світло, відбите від мокрої дороги чи капота, частково поляризоване, тому поляризаційні окуляри водія зменшують відблиски. Рідкокристалічні дисплеї панелі приладів працюють на керуванні поляризацією.

Квантові властивості світла. Світло випромінюється і поглинається порціями — фотонами з енергією $E = h \cdot \nu$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Фотоефект — вибивання електронів з речовини під дією світла. Рівняння Ейнштейна: $h \cdot \nu = A + mv^2/2$, де A — робота виходу. Фотоефект настає лише тоді, коли енергія фотона перевищує роботу виходу, тобто починаючи з певної граничної частоти (червона межа), — незалежно від інтенсивності світла.

Внутрішній фотоефект у напівпровідниках (зростання провідності під дією світла) лежить в основі фоторезисторів, фотодіодів, сонячних батарей і матриць відеокamer. У автомобілі це датчики освітленості для автоматичного ввімкнення фар, датчики сонячного навантаження клімат-контролю, камери заднього виду й систем розпізнавання розмітки та знаків.

Ключові формули

- Довжина електромагнітної хвилі: $\lambda = c/\nu$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
- Закон заломлення: $n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$
- Граничний кут повного відбивання: $\sin \alpha_0 = n_2/n_1$
- Освітленість від точкового джерела: $E = I \cdot \cos \alpha / r^2$
- Енергія фотона: $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$
- Рівняння фотоефекту: $h \cdot \nu = A + mv^2/2$

Питання для самоконтролю

1. Поясніть принцип дії датчика дощу. Яке оптичне явище в ньому використано?
2. Фара створює на відстані 25 м освітленість 32 лк (промені перпендикулярні до поверхні). Яка сила світла фари і яка освітленість на відстані 75 м?
3. Чому світлодіодні фари навантажують бортову мережу менше, ніж галогенні, за однакового світлового потоку?

МОДУЛЬ V. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 20

БУДОВА АТОМА. СПЕКТРИ. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ. РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЛАЗЕРИ

План лекції

1. Ядерна модель атома. Постулати Бора. Енергетичні рівні.
2. Спектри випромінювання та поглинання. Спектральний аналіз мастила й газоаналіз.
3. Рентгенівське випромінювання. Дефектоскопія.
4. Лазер: принцип дії та вимірювальні застосування.

1. Будова атома

Дослідами Резерфорда з розсіювання альфа-частинок на тонкій золотій фользі встановлено: майже вся маса атома й увесь позитивний заряд зосереджені в ядрі, розмір якого приблизно в сто тисяч разів менший за розмір атома; навколо ядра рухаються електрони. Проте класична фізика не могла пояснити стійкість такого атома: електрон, що обертається, мав би випромінювати енергію і впасти на ядро.

Бор запропонував постулати. Електрон в атомі перебуває лише в певних стаціонарних станах з визначеною енергією і в них не випромінює. Під час переходу з рівня з енергією E_k на нижчий рівень E_n атом випромінює фотон: $h \cdot \nu = E_k - E_n$. Поглинання фотона переводить електрон на вищий рівень. Енергетичні рівні кожного хімічного елемента унікальні.

2. Спектри та спектральний аналіз

Нагрітий розріджений газ випромінює лінійчастий спектр — набір окремих ліній, характерних для даного елемента. Холодний газ поглинає світло тих самих довжин хвиль (спектр поглинання). Нагріті тверді тіла і рідини дають суцільний спектр. Спектральний аналіз — визначення хімічного складу речовини за її спектром — дуже чутливий: виявляє домішки в мільйонних частках.

Спектральний аналіз моторного мастила. Проба відпрацьованого мастила спалюється в розряді, і за інтенсивністю спектральних ліній визначають концентрацію металів. Залізо вказує на зношування циліндрів, колінчастого вала, розподільного вала; мідь і свинець — вкладишів підшипників; алюміній — поршнів; хром — поршневих кілець; кремній — потрапляння пилу через несправний повітряний фільтр; натрій і калій — потрапляння охолоджувальної рідини в мастило. Регулярний аналіз мастила дає змогу виявити зношування двигунів автопарку до поломки, не розбираючи їх.

Газоаналізатори. Багатокомпонентні газоаналізатори, якими перевіряють токсичність відпрацьованих газів, визначають вміст CO , CO_2 і вуглеводнів за поглинанням інфрачервоного випромінювання на характерних для кожного газу довжинах хвиль. За складом газів судять про склад суміші, роботу каталітичного нейтралізатора й системи запалювання.

3. Рентгенівське випромінювання

Рентгенівське випромінювання — електромагнітні хвилі з довжиною від приблизно 10^{-8} до 10^{-12} м. Його отримують у рентгенівській трубці: електрони, розігнані високою напругою, різко гальмуються на аноді. Рентгенівські промені мають велику проникну здатність, яка залежить від густини й товщини матеріалу, іонізують речовину, спричиняють свічення деяких речовин і засвічують фотоматеріали.

Рентгенівська дефектоскопія. Промені, що пройшли крізь деталь, реєструються на плівці або цифровому детекторі. Внутрішні порожнини, раковини, непровари, тріщини послаблюють промені менше, ніж суцільний метал, і видні на знімку. Так контролюють литі деталі (корпуси, колісні диски, головки блока) і відповідальні зварні шви. Рентгенівське обладнання працює лише в захищених приміщеннях з дотриманням вимог радіаційної безпеки.

4. Лазер

Лазер — джерело світла, у якому використано вимушене випромінювання: фотон, що пролітає поруч зі збудженим атомом, змушує його випромінити такий самий фотон — тієї ж частоти, фази, напрямку і поляризації. Якщо в активному середовищі створити інверсну заселеність (збуджених атомів більше, ніж незбуджених), а середовище розмістити між дзеркалами, лавина фотонів багаторазово посилюється. Лазерне випромінювання монохроматичне, когерентне і дуже слабо розходить.

Застосування в автомобільній галузі. Лазерні далекоміри вимірюють відстань за часом прольоту імпульсу. Стенди контролю кутів установа коліс використовують лазерні промені або камери з мішенями, забезпечуючи точність у кутові хвилини. Лідари систем допомоги водієві сканують простір лазерними імпульсами і будують тривимірну картину оточення. У виробництві лазером ріжуть і зварюють деталі кузова, наносять маркування, гартують поверхні. Лазерне випромінювання небезпечне для очей навіть у разі відбиття; дивитися в промінь заборонено.

Ключові формули

- Постулат Бора (частота переходу): $h \cdot \nu = E_k - E_n$
- Енергія фотона: $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
- Довжина хвилі випроміненого фотона: $\lambda = h \cdot c / (E_k - E_n)$

Питання для самоконтролю

1. Під час переходу між рівнями атом випромінив фотон з енергією 2,1 eV. Обчисліть довжину хвилі. До якої ділянки спектра вона належить?
2. Аналіз мастила показав різке зростання вмісту кремнію й заліза. Про що це свідчить і що треба перевірити в першу чергу?
3. Чому рентгенівська дефектоскопія дає змогу виявити раковину всередині виливка, яку не видно ззовні?

ЛЕКЦІЯ 21

БУДОВА ЯДРА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ДОЗИ ТА ЗАХИСТ. СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ Й ПЕРСПЕКТИВИ ТРАНСПОРТУ

План лекції

1. Склад ядра. Ядерні сили. Енергія зв'язку.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду. Ядерні реакції.
3. Реєстрація випромінювань. Дози. Радіаційний захист.
4. Сучасна фізична картина світу. Фізичні основи альтернативних джерел енергії на транспорті.

1. Атомне ядро

Ядро складається з протонів і нейтронів (нуклонів). Кількість протонів Z — зарядове число, що визначає хімічний елемент; масове число $A = Z + N$. Ізотопи — атоми одного елемента з різною кількістю нейтронів.

Протони в ядрі відштовхуються кулонівськими силами, але ядро стійке завдяки ядерним силам — дуже інтенсивним, але короткодійним, що діють лише між сусідніми нуклонами.

Маса ядра менша за суму мас вільних нуклонів. Різниця — дефект маси Δm , а відповідна енергія $E = \Delta m \cdot c^2$ — енергія зв'язку, яку треба затратити, щоб розділити ядро на нуклони. Питома енергія зв'язку найбільша в ядер середньої маси (близько заліза), тому енергія вивільняється і під час поділу важких ядер, і під час синтезу легких.

2. Радіоактивність

Радіоактивність — самочинне перетворення нестійких ядер із випромінюванням. Альфа-випромінювання — ядра гелію; має найбільшу іонізувальну здатність і найменшу проникну: затримується аркушем паперу або шаром шкіри. Бета-випромінювання — потік електронів; затримується кількома міліметрами алюмінію. Гамма-випромінювання — високоенергетичні фотони; має найбільшу проникну здатність і послаблюється лише товстим шаром свинцю, бетону, ґрунту.

Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-(t/T)}$, де T — період напіврозпаду, за який розпадається половина наявних ядер. Для різних ізотопів T становить від мікросекунд до мільярдів років. Активність $A = \lambda \cdot N$ (кількість розпадів за секунду) вимірюється в бекерелях.

Поділ важкого ядра урану під дією нейтрона з вивільненням енергії і кількох нових нейтронів уможливує ланцюгову реакцію, керовану в ядерному реакторі. Термоядерний синтез легких ядер живить Сонце, але для промислової енергетики ще не освоєний.

Радіоактивні ізотопи в техніці: радіоізотопні товщиноміри в прокатному й шинному виробництві, гамма-дефектоскопія зварних швів трубопроводів і резервуарів, радіоізотопні рівнеміри, методи мічених атомів для вимірювання зношування деталей двигуна без розбирання.

3. Реєстрація випромінювань. Дози. Захист

Іонізуюче випромінювання органи чуття не сприймають, тому його реєструють приладами: газорозрядним лічильником Гейгера — Мюллера, сцинтиляційними і

напівпровідниковими детекторами. Побутові й професійні дозиметри показують потужність дози.

Поглинена доза D — енергія випромінювання, поглинена одиницею маси речовини, вимірюється в греях ($\text{Гр} = \text{Дж/кг}$). Різні види випромінювання за однакової поглиненої дози спричиняють різний біологічний ефект, тому вводять еквівалентну дозу $H = D \cdot k$ з коефіцієнтом якості (для гамма- і бета-випромінювання 1, для альфа 20), одиниця — зіверт. Природний радіаційний фон в Україні зазвичай становить 0,10–0,20 мкЗв/год.

Захист ґрунтується на трьох принципах. Захист часом: доза пропорційна тривалості опромінення. Захист відстанню: від точкового джерела інтенсивність спадає обернено пропорційно квадрату відстані, подвоєння відстані зменшує дозу вчетверо. Захист екрануванням: матеріал вибирають залежно від виду випромінювання. Альфа-джерела ззовні майже безпечні, але найнебезпечніші при потраплянні всередину організму з пилом, їжею, водою; тому в зонах радіоактивного забруднення головне — захист органів дихання, герметизація кабіни та ретельне миття техніки. Фільтр вентиляції салону й повітряний фільтр двигуна автомобіля, що працював у такій зоні, накопичують радіоактивний пил і потребують обережної заміни та утилізації.

4. Сучасна фізична картина світу. Перспективи транспорту

Курс завершено, і варто озирнутися. Ви почали з похибок вимірювання — з розуміння, що будь-яке число має межі достовірності. Далі механіка пояснила, чому гальмівний шлях зростає пропорційно квадрату швидкості і чому автомобіль на повороті йде в занос. Термодинаміка показала, чому двигун внутрішнього згоряння в найкращому разі перетворює на роботу менше половини енергії палива, і куди йде решта. Електродинаміка пояснила, як працюють акумулятор, генератор, стартер і котушка запалювання. Оптика і квантова фізика — як працюють фари, датчики, радары і лідари.

Класична фізика чудово описує світ у звичних масштабах і швидкостях, але має межі: на атомних масштабах працює квантова механіка, на швидкостях, близьких до швидкості світла, — теорія відносності (її поправки навіть ураховують у супутникових навігаційних системах). Знати межі застосовності моделі так само важливо, як знати саму модель.

Фізичні основи альтернативних силових установок. Акумуляторний електромобіль перетворює електричну енергію на механічну з ККД приводу близько 85–90 %, проти 25–40 % у двигуна внутрішнього згоряння, і повертає частину енергії під час рекуперативного гальмування. Його обмеження — питома енергія батареї (у десятки разів менша, ніж у палива) і час заряджання. Паливний елемент перетворює хімічну енергію водню й кисню безпосередньо на електричну, минаючи теплову стадію, тому не обмежений ККД циклу Карно; продукт реакції — вода. Гібридна установка поєднує двигун внутрішнього згоряння, який працює в зоні найкращого ККД, з електричним приводом і рекуперацією. Жодна з технологій не порушує закону збереження енергії, і будь-яку рекламну заяву щодо «революційної економії» ви тепер здатні перевірити розрахунком.

У наступних семестрах ви зустрінете ці самі закони в іншому вигляді. «Технічна механіка» — розгорнута механіка твердого тіла. «Автомобільні двигуни» — розгорнута термодинаміка. «Електрообладнання автомобілів» та «Електронні та мікропроцесорні системи керування автомобілів» — розгорнута електродинаміка й фізика напівпровідників. «Комп'ютерні технології та діагностика автомобілів» — фізика датчиків і вимірювань.

Жодного нового фундаментального закону там не буде: будуть детальні методики на тій самій основі.

Головне, що варто винести з курсу, — звичка ставити запитання «чому». Автомобіль приїжджає на сервіс не з назвою несправності, а з симптомом. Фахівець, який розуміє фізику процесу, від симптому йде до причини. І зовсім практичне наостанок: перевіряйте розмірність. Це найпростіший і найнадійніший спосіб зловити власну помилку.

Ключові формули

- Масове число: $A = Z + N$
- Дефект маси: $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{ядра}}$; енергія зв'язку: $E = \Delta m \cdot c^2$
- Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-(t/T)}$
- Активність: $A = \lambda \cdot N$, Бк
- Еквівалентна доза: $H = D \cdot k$, Зв
- Захист відстанню: $I \sim 1/r^2$

Питання для самоконтролю

1. Період напіврозпаду ізотопу 8 діб. Яка частка ядер залишиться через 24 доби?
2. Чому альфа-випромінювання майже безпечне ззовні, але найнебезпечніше при потраплянні всередину організму? Які заходи захисту водія й техніки впливають із цього?
3. Чому паливний елемент може мати ККД, вищий за граничний ККД теплового двигуна, що працює в тих самих температурних умовах?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 2 проводиться після завершення модуля V і охоплює матеріал лекцій 12–21.