

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет



ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти освітньої програми «Інформаційні системи та
технології охорони і безпеки» галузі знань F Інформаційні
технології спеціальності F6 Інформаційні системи та технології
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 681.5:004:53.08
Ф48

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № ___ від _____ 2026 року.

Голова Вченої ради факультету КІТ _____ Інна КОНДІУС

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛЩУК

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки ЛНТУ, протокол № ___ від _____ 2026 року.

Укладачі: _____ Олег КАЙДИК, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки ЛНТУ

_____ Тарас ТЕРЛЕЦЬКИЙ, кандидат технічних наук, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки ЛНТУ

Рецензент: _____ Віктор ДЕНИСЮК, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Тарас ТЕРЛЕЦЬКИЙ, кандидат технічних наук, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки ЛНТУ

Ф48 Фізичні основи інформаційних систем: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки» галузі знань 12 (F) Інформаційні технології спеціальності 126 (F6) Інформаційні системи та технології денної та заочної форм навчання / уклад. О. Л. Кайдик, Т. В. Терлецький. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 144 с.

У пропонованому виданні міститься шість лекцій до курсу «Фізичні основи інформаційних систем».

Конспект лекцій з курсу «Фізичні основи інформаційних систем» спрямований на розвиток наукового світогляду та критичного мислення у здобувачів освіти через глибоке розуміння фізичних процесів, які закладено в основу сучасних технологій. Основною метою видання є структурування знань про фундаментальні фізичні явища та розкриття їх безпосередньої ролі у функціонуванні апаратних засобів охорони та безпеки. Особлива увага акцентується на формуванні зв'язку між теоретичними засадами та їх практичною реалізацією в інформаційних системах.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобальної цифровізації доводить, що надійність будь-якої інформаційної системи визначається не лише досконалістю програмних алгоритмів, а й стабільністю її фізичного базису. В основі кожної технології – від простого давача руху до складних криптографічних систем – покладено фундаментальні закони природи. Саме тому вивчення курсу «Фізичні основи інформаційних систем» є ключовою ланкою у підготовці фахівців, здатних розуміти «архітектуру реальності», на якій функціонують цифрові технології.

Ефективне забезпечення безпеки об'єктів сьогодні неможливе без розуміння принципів перетворення фізичних величин у цифрові дані. Концепція сучасної охорони базується на взаємодії сенсорів, каналів передачі сигналів та обчислювальних потужностей, де кожен елемент працює за законами механіки, електродинаміки чи оптики. Глибокі знання цих процесів дозволяють фахівцям бачити за апаратною частиною системи конкретні фізичні явища, що дозволяє максимально точно прогнозувати поведінку засобів захисту в екстремальних умовах.

Даний конспект лекцій розроблено для здобувачів освіти за освітньою програмою «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки». Його мета – структурування знань про фізичну природу інформаційних процесів та формування бази для проектування високонадійних систем контролю. Матеріал поєднує теоретичну фундаментальність із прикладним спрямуванням, допомагаючи майбутнім фахівцям цієї галузі не просто експлуатувати готові рішення, але й розуміти межі їх можливостей, які закладено самою природою.

Опанування цього курсу стане основою для подальшого вивчення спеціалізованих дисциплін та розробки інноваційних технологій, які дозволять забезпечити захищеність інформаційного простору та фізичних об'єктів у динамічному техногенному середовищі.

ЗМІСТ

Сторінка

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. Фізична суть інформаційної системи у розрізі засобів охорони та безпеки	
Тема 1. Інформаційна система її структура та класифікація	5
Тема 2. Фізична величина. Системи одиниць фізичних величин	19
Тема 3. Фізичні основи інформаційних систем	27
Тема 4. Типи апаратних засобів охорони та безпеки в інформаційних системах	46
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. Фізичні явища: властивості та опис	
Тема 5. Фізичні основи апаратних засобів охорони та безпеки: механіка	66
Тема 6. Фізичні основи апаратних засобів охорони та безпеки: електромагнетизм, оптика, хвилі, акустика	111
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. Фізична суть інформаційної системи у розрізі засобів охорони та безпеки

ТЕМА 1. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЇЇ СТРУКТУРА ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

План:

- 1.1 Поняття інформаційної системи.
- 1.2 Етапи розвитку інформаційних систем.
- 1.3 Процеси, які протікають в інформаційних системах.
- 1.4 Структура інформаційної системи.
- 1.5 Класифікація інформаційних систем

1.1 Поняття інформаційної системи

Під системою слід розуміти будь-який об'єкт, який доцільно розглядати і як єдине ціле, і як об'єднана, в інтересах досягнення поставлених цілей, сукупність різнорідних елементів. Системи відрізняються між собою як за складом, так і за основними цілями (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Приклади систем

Система	Елемент системи	Головна мета системи
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Фірма	Люди, обладнання, матеріали, будівлі тощо	Виробництво товарів
Комп'ютер	Електронні та електромеханічні елементи, лінії зв'язку тощо	Оброблення даних
Телекомунікаційна система	Комп'ютери, модеми, кабелі, мережеве та програмне забезпечення тощо	Передавання інформації
Інформаційна система	Комп'ютери, комп'ютерні мережі, люди, інформаційне та програмне забезпечення	Виробництво професійної інформації
Система відеоспостереження	Відеокамера, IP-камера, відеореєстратор, відеосервер, монітор, дротові та бездротові лінії зв'язку тощо	Спостереження у місцях, які потребують постійного нагляду
Система охоронної сигналізації	Приймальний (контрольно-приймальний) пристрій, охоронні сповіщувачі, світло-звукові пристрої, лінії зв'язку, джерела та ланцюги живлення	Збір, оброблення та передача інформації про проникнення (спробу проникнення) на об'єкт, який охороняється

Кінець таблиці 1.1

1	2	3
Система контролю і управління доступом	Програмно-апаратні технічні засоби контролю, система відеоспостереження, система охоронної сигналізації, система пожежної сигналізації	Регулювання переміщення людей/транспорту на об'єкті, який знаходиться під охороною

Інформаційною системою (ІС) прийнято називати пов'язану сукупність засобів, методів і персоналу, що застосовується для зберігання, оброблення та видачі інформації в інтересах досягнення поставленої мети. ІС спрямовані, на те щоб забезпечити збір, зберігання, оброблення, пошук та видачу інформації, яка буде необхідна під час прийняття рішення для вирішення завдань різної складності. Вони допомагають аналізувати проблему та створити новий продукт.

У якості основного технічного засобу переробки інформації використовують сучасну мікропроцесорну техніку. Поряд з персональним комп'ютером до складу технічної бази ІС можуть входити гаджети, реєстратори, приймальні або контрольно-приймальні пристрої, приймально-контрольні панелі, сервера або мейнфрейми (mainframe).

Особливу роль в ІС приділено людині, оскільки технічна реалізація такої системи спрямована на отримання інформації, яка її цікавить.

На практиці прагнуть розмежувати комп'ютери (мікропроцесорну техніку) та інформаційні системи, оскільки перші, оснащено спеціалізованими програмними засобами, а це є технічною базою й інструментом для ІС. У свою чергу, ІС не може функціонувати без персоналу, який взаємодіє з комп'ютерами, телекомунікаціями та іншими супутніми системами.

1.2 Етапи розвитку інформаційних систем

Для нульового покоління (4000 р. до Р.Х.-1900 р.), протягом шести тисяч років, притаманне ручне оброблення інформації: від глиняних табличок до папірусу, потім до пергаменту, а наприкінці, до паперу. Під час зазначеного періоду спостерігається багато нововведень у поданні даних, зокрема, виокремлюється обмін і зберігання інформації локального значення.

Перше покоління (1900-1950 р.) пов'язане із технологією перфокарт, для якої при запис даних на них здійснювався у вигляді двійкових кодів. Виробництво електромеханічного обладнання для запису даних на карти, у період з 1915 р. до 1960 р., дозволило сортувати інформацію та подавати/складати її у вигляді таблиць.

Громіздкість обладнання, необхідність зберігання великої кількості перфокарт зумовило появу нової технології, яка дозволила б електромеханічні комп'ютери.

Перші інформаційні системи з'явилися у 50-х роках ХХ століття. Реалізовувались такі ІС на електромеханічних бухгалтерських рахувальних машинах, і були спрямовані на оброблення рахунків й розрахунку заробітної плати. Це дозволило скоротити витрати та час на підготовлення паперових документів.

У 60-ті роки минулого століття спостерігається зміна ставлення до інформаційних систем. Інформація, яку отримували з ІС, почала застосовуватися, за багатьма параметрами, для періодичної звітності. У даний період починає розвиватись комп'ютерне обладнання широкого призначення, яке здатне обслуговувати безліч функцій.

70-ті роки ... початок 80-х років. ІС широко застосовують у якості засобів управлінського контролю, що підтримує та прискорює процес прийняття рішень.

До кінця 80-х років концепція використання ІС змінюється. Такі системи стають стратегічним джерелом інформації й використовуються на усіх рівнях організації будь-якого профілю. Притаманні для цього періоду ІС допомагають досягти стрімкого успіху, створювати нові товари та послуги, знаходити нові ринки збуту, забезпечувати собі гідних партнерів, організувати випуск продукції за нижчою ціною тощо.

1.3 Процеси, які протікають в інформаційних системах

Інформаційна система дозволяє оперувати інформацію про організацію та її оточення. Основними операціями ІС прийнято вважати: введення, оброблення та виведення необхідної інформації.

Зворотній зв'язок – являє собою певний висновок, який повертають відповідним особам або процесам, з метою оцінювання або корегування введення (рис. 1.1).

Такі дійові особи середовища як споживачі, постачальники, конкуренти, представники влади, взаємодіють із організацією та її ІС (рис. 1.2).

Під інформацією необхідно розуміти дані, які оформляють таким чином, щоб вони були змістовними й корисними для подальшої діяльності людини. Щодо даних, то вони, являють собою «сирі» факти про події, які мають місце в організації або фізичному середовищі.

Процеси, які забезпечують роботу інформаційної системи:

- введення інформації із зовнішніх або внутрішніх джерел;
- оброблення вхідної інформації (класифікація, розподіл, обчислення) і

представлення її у зручному для сприйняття вигляду;

- виведення інформації для представлення споживачам або передавання її в іншу систему;
- зберігання інформації може здійснюватися на етапах введення, оброблення і виведення;
- зворотний зв'язок – оброблена інформація, яку застосовують для корегування вхідної інформації.



Рисунок 1.1 – Взаємозв'язок елементів інформаційної системи

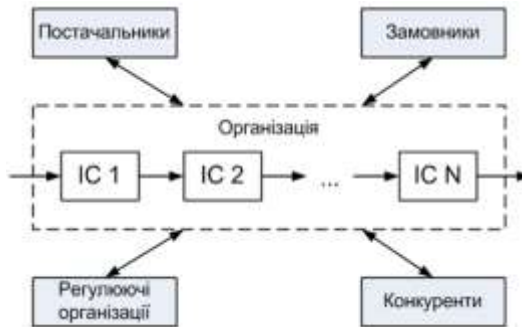


Рисунок 1.2 – Взаємозв'язок внутрішніх інформаційних систем із зовнішніми системами

Інформаційній системі притаманні наступні властивості:

- будь-яка ІС може бути піддана аналізу, побудована і керована на основі загальних принципів побудови систем;
- ІС є динамічною і розвивається;
- при побудові ІС необхідно використовувати системний підхід;

- вихідним параметром ІС є інформація, на основі якого і приймають рішення;
- ІС доцільно сприймати як людино-комп'ютерну систему оброблення інформації.

Впровадження ІС сприяє:

- отриманню більш раціональних варіантів вирішення управлінських завдань за рахунок впровадження математичних методів та інтелектуальних систем;
- звільненню працівників від рутинної роботи за рахунок її автоматизації;
- забезпеченню достовірності інформації;
- заміни паперових носіїв інформації на магнітні та електричні;
- вдосконаленню структури потоків інформації і системи документообігу на виробництві;
- зменшенню витрат на виробництво продуктів і послуг;
- наданню споживачам унікальних послуг;
- пошуку нових ринкових ланок;
- прив'язці до форми покупців та постачальників за рахунок надання їм різних знижок і послуг.

1.4 Структура інформаційної системи

Структуру ІС (рис. 1.3) становить сукупність окремих її частин, які називаються підсистемами. У свою чергу підсистема – це частина системи, яку виокремлено за якою-небудь ознакою.



Рисунок 1.3 – Структура інформаційної системи

Загальну структуру ІС прийнято розглядати у вигляді сукупності підсистем незалежно від сфери їх застосування, які при цьому і забезпечують її роботу.

1.4.1 Інформаційне забезпечення

Призначення підсистеми інформаційного забезпечення полягає у

своєчасному формуванні й видачі достовірної інформації для прийняття управлінських рішень.

Інформаційне забезпечення – це сукупність єдиної системи класифікації та кодування інформації, уніфікованих систем документації, схем інформаційних потоків, які циркулюють в організації, а також методологія побудови баз даних.

Уніфіковані системи документації створюються на державному, галузевому та регіональному рівнях. Їх головна мета – забезпечити однакові показники у різних сферах виробництва.

Схеми інформаційних потоків відображають маршрути руху інформації і її об'єми, місця виникнення первинної інформації та використання кінцевої інформації. На основі аналізу структури таких схем зазвичай розробляють заходи щодо вдосконалення усєї системи управління.

Побудова схем інформаційних потоків, які дозволяють виявити об'єм інформації й провести її детальний аналіз, забезпечує:

- виключення дублюючої і невикористаної інформації;
- класифікацію й раціональне подання інформації.

Методологія побудови баз даних базується на теоретичних засадах їх проектування та включає у себе два етапи:

– 1-й етап: обстеження усіх функціональних підрозділів підприємства з метою: зрозуміти специфіку та структуру її діяльності; побудувати схему інформаційних потоків; проаналізувати існуючу систему документообігу; визначити інформаційні об'єкти й відповідний склад реквізитів (характеристик), що описують їх властивості і призначення;

– 2-й етап: побудова концептуальної інформаційно-логічної моделі даних для сфери діяльності, обстеженої на 1-му етапі (для цієї моделі необхідно встановити й оптимізувати усі зв'язки між об'єктами і їх реквізитами).

Інформаційно-логічну модель прийнято вважати фундаментом, на якому створюється будь-яка база даних.

1.4.2 Технічне забезпечення

Технічне забезпечення – це комплекс технічних засобів (у тому числі необхідна документація на ці засоби й технологічні процеси), які призначені для роботи ІС.

Комплекс технічних засобів формується з:

- пристроїв передавання даних та ліній зв'язку;
- відеокамер, охоронних та пожежних сповіщувачів, світло-звукових пристроїв, пожежних давачів тощо;
- пристроїв збору, накопичення, оброблення, передавання і виведення інформації;

- оргтехніки та пристроїв автоматичного знімання інформації;
- експлуатаційних матеріалів тощо.

Попередній вибір технічних засобів, організація їх експлуатації, технологічний процес оброблення даних та технологічне оснащення прийнято оформляти у вигляді технічної документації. На практиці усю документацію поділяють на три групи:

- загальносистемна – включає державні та галузеві стандарти з технічного забезпечення;
- спеціалізована – містить комплекс методик для всіх етапів розробки технічного забезпечення;
- нормативно-довідкова – використовують під час виконання розрахунків з технічного забезпечення.

Основними формами організації технічного забезпечення (форми використання технічних засобів) прийнято вважати: централізовану й частково або повністю децентралізовану.

Централізоване технічне забезпечення базується на використанні в ІС великих обчислювальних машин та обчислювальних центрів, а децентралізоване – реалізацію функціональних підсистем на ПК безпосередньо на робочих місцях.

Найбільш перспективним підходом є частково децентралізований підхід – організація технічного забезпечення на базі розподілених мереж, які складаються з ПК і великих обчислювальних машин для зберігання баз даних, спільних для будь-яких функціональних підсистем.

1.4.3 Математичне та програмне забезпечення

Математичне та програмне забезпечення являє собою сукупність математичних методів, моделей, алгоритмів і програм, які призначені для реалізації цілей та задач ІС та нормального функціонування комплексу технічних засобів.

До засобів математичного забезпечення прийнято відносити:

- засоби моделювання процесів управління;
- типові завдання управління;
- методи математичного програмування, математичної статистики, теорії масового обслуговування тощо.

До складу програмного забезпечення входять загальносистемні та спеціальні програмні продукти, а також технічна документація.

До загальносистемного програмного забезпечення прийнято відносити комплекси програм, які зорієнтовано на користувачів та призначені для вирішення типових завдань оброблення інформації. Їх мета – це розширення функціональних можливостей технічних засобів, контролю й управління

процесом оброблення даних.

Спеціальне програмне забезпечення являє собою сукупність програм, які розроблено під час створення конкретної ІС. До його складу входять пакети прикладних програм, які реалізують розроблені моделі різного ступеня адекватності та відображають функціонування реального об'єкта.

Технічна документація на розроблення програмних засобів повинна містити опис завдань, завдання на алгоритмізацію, економіко-математичну модель задачі, контрольні приклади.

1.4.4 Організаційне забезпечення

Організаційне забезпечення – це сукупність методів та засобів, які регламентують взаємодію працівників із технічними засобами і між собою під час розроблення та експлуатації ІС.

Організаційне забезпечення покликане реалізувати наступні функції:

- аналіз існуючої системи управління організацією, де буде використовуватися ІС, та виявлення задач, які підлягають автоматизації;
- підготовку завдань до вирішення, включаючи технічне завдання на проектування ІС та техніко-економічне обґрунтування її ефективності;
- розроблення управлінських рішень за складом та структурі організації, методології вирішення завдань, спрямованих на підвищення ефективності системи управління.

1.4.5 Правове забезпечення

Правове забезпечення – це сукупність правових норм, які визначають створення, юридичний статус та функціонування ІС, а також регламентують порядок отримання, перетворення і використання інформації.

Головною метою правового забезпечення є зміцнення законності.

До складу правового забезпечення входять закони, укази, постанови державних органів влади, накази, інструкції та інші нормативні документи міністерств, відомств, організацій, місцевих органів влади.

У правовому забезпеченні прийнято виділяти загальну частину, яка регулює функціонування будь-якої ІС та локальну – регулює функціонування конкретної системи.

Правове забезпечення етапів функціонування ІС включає у себе: статус ІС; права, обов'язки та відповідальність персоналу; правові положення окремих видів процесу управління; порядок створення та використання інформації тощо.

1.5 Класифікація інформаційних систем

На партиці, інформаційні системи прийнято класифікувати за різними ознаками, усе залежить від мети її ідентифікації. Зазвичай, інформаційні системи

поділяють за:

- ознакою структурованості задач, які будуть вирішуватись системою;
- ступенем автоматизації;
- характером інформації та сферою застосування;
- за формальністю;
- за функціональною ознакою та рівнями управління.

1.5.1 Класифікація за ознакою структурованості задач

В теорії інформаційних систем розрізняють три типи завдань, для яких створюються ІС (рис. 1.4): структуровані (формалізовані), неструктуровані (неформалізовані) і частково структуровані.



Рисунок 1.4 – Класифікація інформаційних систем за ознакою структурованості задач

Структуроване (формалізоване) завдання – це завдання, де відомими є усі її елементи та взаємозв’язки між ними.

Неструктуроване (неформалізоване) завдання – це завдання, у якому неможливо виділити елементи та встановити між ними зв’язки.

Зміст структурованого завдання прийнято виражати у формі математичної моделі, для якої притаманним є свій алгоритм вирішення. Такі завдання, зазвичай, є систематичними, їх доводиться вирішувати багато разів, а отже вони носять рутинний характер.

Метою використання ІС для вирішення структурованих завдань є повна автоматизація їх вирішення, тобто зведення ролі людини до нуля.

Вирішення неструктурованих завдань, враховуючи неможливість створення математичного опису та розроблення алгоритму, супроводжується великими труднощами. Можливості застосування ІС, для цього випадку, є невеликою, та й прийняття рішення покладається тільки на людину (прийняття евристичних

рішень на основі набутого досвіду й непрямой інформації з різних першоджерел).

Аналіз повністю структурованих або зовсім неструктурованих завдань вказує на те, що спільним для них є лише частина складових елементів та зв'язків між ними. Такі завдання називають частково структурованими.

Для даних умов створюють частково автоматизовані ІС, оскільки отримана інформація буде аналізуватись людиною, яка й прийматиме по ній остаточне рішення.

ІС, які застосовують під час вирішення частково структурованих задач, поділяються на два види:

- ті, які орієнтовано на оброблення даних;
- ті, які формують альтернативні рішення.

Перші ІС здатні забезпечити інформаційну підтримку в системі, тобто надати доступ до інформації у базі даних та частково її обробити. Другі – розробляють альтернативні рішення, та можуть бути як модельними, так і експертними.

Модельні ІС надають користувачеві математичні, статистичні та інші моделі, використання яких полегшує вироблення й оцінювання альтернативного рішення. Користувач, при цьому, отримує необхідну інформацію, яка буде необхідною для прийняття рішення, шляхом встановлення діалогу з моделлю в процесі її дослідження.

Основними функціями модельної ІС є:

- можливість роботи в середовищі типових математичних моделей;
- достатньо швидка й адекватна інтерпретація результатів моделювання;
- оперативна підготовка та корегування вхідних параметрів та обмежень моделі;
- можливість графічного відображення динаміки моделі;
- обґрунтування прийнятої моделі (її формування та робота).

Експертні ІС покликані забезпечити вироблення та оцінювання можливих альтернатив за рахунок створення експертних систем, пов'язаних із обробленням отриманої інформації (набутих знань).

1.5.2 Класифікація за ступенем автоматизації

Залежно від ступеня автоматизації інформаційних процесів в ІС їх прийнято класифікувати на ручні, автоматичні та автоматизовані.

Ручні ІС характеризуються відсутністю сучасних технічних засобів переробки опрацювання інформації та виконанням усіх операцій людиною.

В автоматичних ІС опрацювання інформації здійснюється самою системою, тобто без участі людини. Щодо автоматизованих, то такі ІС передбачають наявність під час опрацювання інформації як людини, так і сучасних технічних

засобів, перевагу при цьому надають останнім.

1.5.3 Класифікація за характером використання інформації

Автоматизовані ІС, з огляду на їх широке використання в організації різноманітних процесів управління, містять різні модифікації та можуть бути класифікована як за характером використання інформації, так і за сферою їх застосування (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Класифікація інформаційних систем за сферою застосування та за характером інформації

За допомогою інформаційно-пошукових систем здійснюють введення, систематизацію, зберігання та видачу інформації за запитом без складних перетворень даних.

Інформаційно-вирішувачі системи покликані здійснювати усі операції опрацювання інформації за відповідним алгоритмом. Їх прийнято класифікувати за ступенем впливу виробленої інформації на процес прийняття рішень: керуючі та для поради.

Для керуючих ІС притаманним є вироблення відповідної інформації (завдання розрахункового характеру й оброблення великого об'єму даних), на підставі якої людина буде приймати остаточне рішення.

ІС для поради зосереджені на формуванні вихідної інформації, яка буде прийматись людиною до уваги і не буде перетворюватись у серію конкретних

дій. Такого роду системи володіють більш високим ступенем інтелекту, тому що для них характерним є опрацювання набутих системою знань, а не даних.

1.5.4 Класифікація за сферою застосування

ІС організаційного управління призначені для автоматизації функцій управлінського персоналу. До цього класу відносяться ІС призначені для управління як промисловими, так і непромисловими об'єктами.

Основними функціями подібних систем є: оперативний контроль і регулювання, оперативний облік та аналіз, перспективне й оперативне планування, бухгалтерський облік, управління збутом і постачанням та інші економічні й організаційні завдання.

ІС управління технологічними процесами призначені для автоматизації функцій виробничого персоналу. Такі системи використовують під час організації поточкових ліній, виготовленні складових елементів готової продукції, на складанні, для підтримки технологічних процесів різних галузей промисловості.

Інформаційні САПР (системи автоматизованого проектування) призначені для автоматизації функцій інженерів-проектувальників, конструкторів під час створення нових зразків пристроїв/обладнання або технології. Основними функціями подібних систем є: інженерні розрахунки, створення графічної документації (креслень, схем, планів), створення проектної документації, моделювання об'єктів, які проектуються.

Інтегровані (корпоративні) ІС використовують для автоматизації усіх функцій виробничого циклу і охоплюють увесь спектр робіт від проектування до збуту продукції.

1.5.5 Класифікація за формальністю

Формальні ІС базуються на прийнятті жорстких визначеннях даних та процедур збору, зберігання, оброблення, виправлення помилок і використання цих даних. Системи цього типу є структурованими, це значить, що вони працюють за заздалегідь встановленими правилами.

На відміну від формальних, неформальні ІС не встановлюють ніяких правил та не містять жодної інформації про зберігання й оброблення як вхідних, так і вихідних параметрів.

1.5.6 Класифікація за ступенем автоматизації

Функціональна ознака ІС визначає, перш за усе, призначення підсистеми, а також її основні цілі, завдання та функції. Структуру ІС прийнято подавати у вигляді сукупності її функціональних підсистем, а функціональні ознаки використовувати для класифікації ІС.

З точки зору господарської практики типовими видами діяльності, які

визначають функціональну ознаку класифікації ІС, є: виробнича, маркетингова, фінансова та кадрова.

Виробнича діяльність пов'язана з безпосереднім випуском продукції і спрямована на створення та впровадження у виробництво науково-технічних нововведень.

Маркетингова діяльність включає у себе:

- аналіз ринку виробників і споживачів продукції, яка виготовляється, аналіз продаж;
- організацію рекламної кампанії з просування продукції
- раціональну організацію матеріально-технічного постачання.

Фінансова діяльність пов'язана з організацією контролю й аналізу фінансових ресурсів на основі статистичної та оперативної інформації.

Кадрова діяльність спрямована на підбір і розстановку необхідних фахівців, а також ведення службової документації з різних аспектів.

Зазначені напрямки діяльності визначають типовий набір ІС:

- виробничі системи;
- системи маркетингу;
- фінансові та облікові системи;
- системи квадрів (людських ресурсів);
- інші ІС, які виконують допоміжні функції залежно від виду діяльності.

Рекомендована література: [1; 2; 3; 6].

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть типові види діяльності, які визначають функціональну ознаку класифікації ІС.
2. Обґрунтуйте, чому на практиці прагнуть розмежувати комп'ютери (мікропроцесорну техніку) та інформаційні системи.
3. Опишіть основні форми організації технічного забезпечення.
4. Опишіть, у чому полягає критична відмінність інформаційної системи від простого
5. Опишіть, як роль «людини-оператора» змінюється в основних класах інформаційних систем, виділених за ступенем автоматизації.
6. Поясніть різницю між термінами «дані» та «інформація» у контексті роботи інформаційної системи.
7. Поясніть, чим відрізняється система від сукупності елементів.
8. Розмежуйте загальносистемне та спеціальне програмне забезпечення за їх призначенням та цілями.
9. У чому полягає ключова відмінність в призначенні між інформаційною

системою організаційного управління та ІС управління технологічними процесами?

10. У чому полягає ключова функція ІС та як це впливає на процес прийняття рішень?

11. У чому полягає принципова відмінність між модельними ІС та експертними ІС, які застосовуються для вирішення частково структурованих задач?

12. У чому полягає різниця між загальною та локальною частинами правового забезпечення, і що саме вони регулюють?

13. У якому випадку системний підхід є критично важливим під час побудови ІС?

14. Чому зберігання інформації може здійснюватися на кожному етапі роботи ІС?

15. Чому інформаційно-логічна модель даних вважається «фундаментом» для створення будь-якої бази даних?

16. Чому неформальні системи не встановлюють жодних правил щодо вхідних та вихідних параметрів?

17. Що саме перетворює комп'ютерну техніку на повноцінну інформаційну систему?

18. Як властивість ІС бути «людино-комп'ютерною системою» впливає на її динамічність та розвиток?

19. Як змінилося ставлення та призначення інформаційних систем із їх початковою роллю?

20. Як подання та зберігання даних у «Нульовому поколінні» сприяло розвитку обміну та зберіганню інформації у локальному значенні.

21. Яка ключова відмінність між уніфікованими системами документації та схемами інформаційних потоків у підсистемі інформаційного забезпечення?

22. Яка концептуальна зміна відбулася у використанні ІС та яких стратегічних результатів було досягнуто?

23. Яка необхідність правового забезпечення для функціонування ІС?

24. Яка різниця (з точки зору впливу виробленої інформації на процес прийняття остаточного рішення людиною) між керуючими ІС та інформаційними системами для поради?

25. Яка роль комп'ютера в інформаційній системі?

26. Який вихідний параметр ІС є найбільш важливим для прийняття рішень зовнішніми дійовими особами?

27. Яким чином впровадження ІС сприяє отриманню «більш раціональних варіантів вирішення управлінських завдань»?

28. Яким чином зовнішні дійові особи взаємодіють із інформаційною системою організації?
29. Яким чином оброблена інформація, яка повертається через зворотний зв'язок, корегує процес введення даних?
30. Яким чином організаційне забезпечення регламентує взаємодію людей і техніки в ІС?
31. Які елементи сприяють вдосконаленню системи управління?
32. Які операції оброблення вхідної інформації забезпечують перетворення даних на інформацію?
33. Які основні функції повинна забезпечити ІС для досягнення своєї головної мети – виробництва професійної інформації.
34. Які правила та обмеження є визначальними для формальних систем?
35. Які технічні засоби формують технічну базу ІС?
36. Які фундаментальні технологічні нововведення відрізняють «Нульове покоління» від «Першого покоління»?
37. Які функції дозволяють підвищити ефективність системи управління?
38. Яку ключову роль відіграє процес зворотного зв'язку у функціонуванні інформаційної системи?
39. Яку роль у відповідній підсистемі відіграють засоби математичного забезпечення?

ТЕМА 2. ФІЗИЧНА ВЕЛИЧИНА. СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

План:

- 2.1 Основна термінологія та класифікація фізичних величин.
- 2.2 Система одиниць фізичних величин.
- 2.3 Кількісне представлення фізичних величин.
- 2.4 Характеристика систем та одиниць.
- 2.5 Способи вимірювання фізичних величин.

2.1 Основна термінологія та класифікація фізичних величин

Об'єкти довкілля – фізичні тіла, їх системі процеси, що в них відбуваються, мають різноманітні властивості. Якісно однакові властивості можуть відрізнятися між собою кількісним вмістом. Отже, фізична величина, або просто величина – це кожна означена якісно властивість фізичних об'єктів, яка може мати певний розмір. Відповідно до ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення» під фізичною величиною слід розуміти властивість, яка є спільною

для якісного відношення багатьом матеріальним об'єктам але індивідуальною у кількісному відношенні для кожного з них. Приклади фізичних величин: довжина, швидкість, сила електричного струму, температура та інше.

Розмір фізичної величини – це кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті і, як її атрибут, існує об'єктивно, незалежно від того, що ми про нього знаємо. Не слід використовувати термін «величина» як кількісну характеристику цієї властивості, тобто вживати, наприклад «величина напруги», «величина тиску». В таких випадках слід використовувати терміни «розмір» або «значення» як оцінка розміру величини. Отже правильно буде «розмір напруги» чи «значення напруги», «розмір тиску» або «значення тиску».

За характером прояву розмірів під час виконання досліджень фізичні величини поділяються на активні (енергетичні), які здатні самі проявляти свої розміри (температура, струм) та пасивні (параметричні), наприклад, електричний опір, ємність, індуктивність. Розміри цих величин проявляються при дії на об'єкт відповідної активної величини.

Розрізняють скалярні та векторні величини. Скалярні величини можуть бути неполярними, тобто мати лише розмір (маса, об'єм), або полярними, тобто мати, крім розміру, ще й знак (електричний заряд). Векторні величини (сила, швидкість, прискорення) поряд з розміром мають напрям.

Розміри фізичних величин можуть змінюватись неперервно або стрибкоподібно (дискретно). Величина, можливі розміри якої в скінченному проміжку часу, змінюючись, утворюють незліченну множину, називаються неперервними (аналоговими), якщо ця множина зліченна, то дискретними.

Фізичні величини існують в часі та просторі. Тому їх розміри, а у векторних величин ще і напрямки, є функціями часу та координат простору. Якщо розміри скалярних або розміри та напрямки векторних величин не змінюються, то вони називаються сталими (незмінними), якщо ж змінюються, то – змінними величинами. Сталість чи змінність може розглядатися як функція часу або як функція простору. Залежність фізичної величини як функції часу – це процес, а функції координат – поле.

2.2 Система одиниць фізичних величин

Вперше сукупність основних і похідних величин, які утворювали систему, запропонував у 1832 р. К.Ф. Гаус. Як основні одиниці в цій системі прийняті три довільні одиниці: довжини (мм), маси (кг) та часу (с). Пізніше було запропоновано й інші системи одиниць фізичних величин, що базуються на метричній системі заходів, які відрізняються основними одиницями.

У 1960 р. на XI-й Генеральній конференції з мір та ваг було прийнято

Міжнародну система одиниць, яка отримала назву «SI». В нашій країні вона є обов'язковою та діє з 1982 року.

В Україні застосовують наступні одиниці вимірювань, які є рекомендованими Міжнародною організацією законодавчої метрології:

- основні одиниці SI;
- похідні одиниці SI;
- десяткові кратні та часткові одиниць SI.

На практиці зустрічаються випадки коли застосовують також:

- одиниці, які не входять до SI, але дозволені центральним органом виконавчої метрології (дозволені позасистемні одиниці);
- комбінації одиниць SI та дозволенних позасистемних одиниць.

Слід зазначити, що визначення основних одиниць SI, назва та визначення похідних одиниць SI, десяткових кратних і часткових одиниць SI, дозволенних позасистемних одиниць, а також їх позначення та правила написання встановлюються нормативними документами з метрології.

Похідна одиниця системи одиниць ФВ – одиниця похідної фізичної величини системи одиниць, утворена відповідно до рівняння, що зв'язує її з основними одиницями або з основними і вже певними похідними (наприклад, 1 м/с – одиниця швидкості, утворюється з метра та секунди – LT^{-1}).

Системна одиниця ФВ – одиниця фізичної величини, що входить у прийнятну систему одиниць. Основні, похідні, кратні та часткові одиниці SI є системними (наприклад, 1 м; 1 м/с; 1 км).

Позасистемна одиниця ФВ – одиниця ФВ, що не входить у прийнятну систему одиниць (наприклад, децибел (дБ)).

Кратна одиниця ФВ – одиниця ФВ, у ціле число разів більша системної або позасистемної одиниці (наприклад, одиниця частоти кратна герцу – $1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$, одиниця потужності кратна вату – $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$).

Часткова одиниця ФВ – одиниця ФВ, у ціле число разів менша системної або позасистемної одиниці (наприклад, одиниця ємності частка від фараду – $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$).

Розмір одиниці ФВ – кількісна визначеність одиниці фізичної величини, відтвореної або збереженої засобом вимірювань.

2.3 Кількісне представлення фізичних величин

На практиці широко застосовують поняття узаконені одиниці, що розкривається як «система одиниць» або «окремі одиниці», які встановлені для застосування в країні відповідно до законодавчих актів. Система одиниць ФВ – сукупність основних і похідних одиниць фізичних величин, утворена відповідно

до принципів для заданої системи фізичних величин.

Основна одиниця системи одиниць ФВ – одиниця основної фізичної величини в даній системі одиниць. До основних одиниць Міжнародної системи одиниць «SI» відносять:

- метр (м) – це довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за проміжок часу, що дорівнює $1/299792458$ секунди;
- кілограм (кг) – дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма;
- секунда (с) – дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходові між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133;
- ампер (А) – дорівнює силі незмінного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликав би на кожній ділянці провідників завдовжки 1 м силу взаємодії 2×10^{-7} Н;
- моль (моль) – дорівнює кількості речовини системи, яка вміщує стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг;
- кандела (кд) – дорівнює силі світла у заданому напрямі джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою 540×10^{12} Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср.

До додаткових одиниць відносять:

- радіан (рад) – дорівнює куту між двома радіусами кола, дуга між якими дорівнює радіусу;
- стерадіан (ср) – дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

Температуру Кельвіна, допускається замінювати температурою Цельсія, яка визначається як $t = T - T_0 = T - 273,15$ і виражається в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).

2.4 Характеристика систем та одиниць

За ДСТУ 2681-94 «одиниця фізичної величини» – це певний розмір даної величини, прийнятий за згодою з Генеральною конференцією з мір та ваг для кількісного відображення однорідних з нею величин. Одиниця фізичної величини є величиною, якій за визначенням присвоєне числове значення «1».

В природі фізичні величини пов'язані між собою залежностями, які виражають одні величини через інші і називаються рівняннями зв'язку між величинами. Сукупність пов'язаних такими залежностями величин, серед яких одні умовно називаються незалежними, а інші виражаються через них,

називають системою величин. Незалежні величини цієї системи називають основними, а всі інші – похідними.

Одиниця основної величини називається основною одиницею, а похідної – похідною одиницею. Сукупність основних та похідних одиниць певної системи величин становлять систему їх одиниць.

Вибір основних величин і розмірів їх одиниць під час побудови системи одиниць теоретично довільний, але він продиктований певними вимогами практики, а саме:

- кількість основних величин має бути невеликою;
- за основні мають бути вибрані величини, одиниці яких легко відтворити з високою точністю;
- розміри основних одиниць мають бути такі, щоб на практиці значення всіх величин системи не виражались ні надто малими, ні надто великими числами;
- похідні одиниці мають бути когерентні, тобто входити в рівняння, що пов'язують їх з іншими одиницями системи, з коефіцієнтом «1».

Одиниці, які не належать ні до основних, ні до похідних одиниць цієї системи називаються додатковими (наприклад, радіан та стерадіан), а одиниці, що не входять в цю систему, є позасистемними (наприклад, літр (л); тонна (т); градус (°), відсоток (%); проміле (‰), мільйонна частка (млн⁻¹) тощо).

Позасистемними виступають також і логарифмічні одиниці, що визначаються із відношення двох значень величин (наприклад, бел (Б); децибел (дБ); октава (окт); декада (дек) тощо).

2.5 Способи вимірювання фізичних величин

Вимірювання ФВ – це сукупність операцій по застосуванню технічного засобу, який зберігає одиницю фізичної величини і забезпечує знаходження співвідношення вимірюваної величини з її одиницею і одержання значення цієї величини. Інакше кажучи, вимірювання може бути визначене як пізнавальний процес, що полягає в порівнянні шляхом фізичного експерименту даної ФВ з відомою ФВ, прийнятою за одиницю вимірювання. Наприклад, за допомогою вимірювального приладу порівнюють розмір величини, перетвореної в переміщення покажчика, з одиницею, збереженою шкалою цього приладу, і проводять відлік. Або, прикладаючи лінійку з поділками до якої-небудь деталі, по суті, порівнюють її розмір з одиницею, збереженою лінійкою, і, зробивши відлік, одержують значення величини (довжини, висоти, товщини і інших параметрів деталі). Наведене визначення поняття «вимірювання» задовольняє загальному рівнянню вимірювань, що має істотне значення в справі

впорядкування системи понять у метрології. У ньому врахована технічна сторона (сукупність операцій), розкрита метрологічна суть вимірювань (порівняння з одиницею) і показаний гносеологічний аспект (одержання значення величини). У тих випадках, коли неможливо виконати вимірювання (не виділена величина як фізична і не визначена одиниця вимірювань цієї величини) практикується оцінювання таких величин по умовних шкалах. Вимірювання може бути однократним і багатократним. На практиці частіше виконуються саме однократні вимірювання. Наприклад, вимірювання конкретного моменту часу по годинниках, звичайно, проводиться один раз. Але в певних випадках необхідні багаторазові вимірювання, тобто такі, що складаються з ряду однократних вимірювань. Отриманий при цьому ряд вимірювань може бути оброблений відповідно до вимог математичної статистики.

ФВ вимірюють прямим і непрямим способом. У першому випадку шукане значення ФВ одержують безпосередньо. Наприклад, вимірювання сили струму амперметром. При непрямому вимірюванні шукане значення ФВ визначається на підставі результатів прямих вимірювань інших ФВ, функціонально пов'язаних із шуканою величиною. Наприклад, таким є вимірювання потужності P за результатами прямих вимірювань напруги U і струму I , пов'язаних з потужністю рівнянням $P=IU$. У сучасних мікропроцесорних вимірювальних приладах дуже часто обчислення шуканої вимірюваної величини проводиться «усередині» приладу. У цьому випадку результат вимірювання визначається способом, характерним для прямих вимірювань, і немає необхідності і можливості окремого урахування методичної похибки розрахунку. Вона входить у похибку вимірювального приладу. Вимірювання, проведені такого роду ЗВ, відносять до прямих. До непрямого відносяться тільки такі вимірювання, при яких розрахунок здійснюється вручну або автоматично, але після одержання результатів прямих вимірювань. При цьому є можливість урахувати окремо похибки розрахунку. Характерним прикладом такого випадку можуть служити вимірювальні системи, для яких нормовані метрологічні характеристики їхніх компонентів приводяться окремо. Сумарна похибка вимірювань розраховується за нормованими метрологічними характеристиками всіх компонентів системи.

Сукупними називаються проведені одночасно вимірювання декількох однойменних величин, при яких шукані значення величин знаходять рішенням системи рівнянь, одержуваних при прямих вимірюваннях різних сполучень цих величин. Спільними називаються проведені одночасно вимірювання двох або декількох не однойменних величин для визначення залежності між ними. Як видно з наведених визначень, ці два види вимірювань досить близькі одне до одного. В обох випадках шукані значення знаходяться при рішенні системи

рівнянь, коефіцієнти в яких отримані шляхом прямих вимірювань. Відмінність полягає в тому, що при сукупних вимірюваннях одночасно вимірюються кілька однойменних величин, а при спільних – різнойменних.

Всі вимірювання діляться на статичні і динамічні. Метою даної класифікації є можливість прийняття рішення про те, потрібно чи ні при конкретних вимірюваннях враховувати швидкість змінення вимірюваної величини. Похибки, викликані впливом швидкості змінення вимірюваної величини, називаються динамічними. Статичні вимірювання – це вимірювання ФВ, прийнятої відповідно до конкретного вимірювального завдання за незмінну протягом часу вимірювання. Наприклад, вимірювання ємності конденсатора при нормальній температурі. Динамічні вимірювання – вимірювання ФВ, що змінюються за розміром. Точно кажучи, всі ФВ піддані тим або іншим змінам у часі. В цьому переконує застосування все більш і більш чутливих ЗВ, які дають можливість виявляти зміни величин, що раніше вважалися постійними, тому поділ вимірювань на динамічні і статичні є умовним.

У залежності від метрологічного призначення всі вимірювання діляться на технічні і метрологічні. Технічні вимірювання – це вимірювання, проведені за допомогою робочих ЗВ. Метрологічні вимірювання – це вимірювання, виконувані за допомогою еталонів з метою відтворення одиниць ФВ для передачі їхнього розміру робочим ЗВ. При їх здійсненні в обов'язковому порядку враховуються похибки вимірювання, а при технічних вимірюваннях приймається наперед задана похибка, достатня для рішення даного практичного завдання. Технічні вимірювання є найбільш масовим видом вимірювань.

Рекомендована література: [5; 9; 17].

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення кратній та частковій одиниці фізичної величини.
2. За яких умов надають перевагу багатократним вимірюванням?
3. За якою ознакою фізичні величини поділяють на активні та пасивні?
4. Ким вперше було запропоновано сукупність основних і похідних величин, що утворювали систему та які одиниці були прийняті за основні?
5. Коли і де було прийнято Міжнародну систему одиниць? З якого року вона є обов'язковою та діє в Україні?
6. Назвіть усі основні одиниці Міжнародної системи одиниць. Яка з них дорівнює масі міжнародного прототипу?
7. Опишіть відмінності між скалярними та векторними величинами. Наведіть декілька прикладів цих величин.
8. Опишіть, у чому полягає відмінність між радіаном та стердіаном.

9. Опишіть ключову відмінність між прямими та непрямыми вимірюваннями.

10. Опишіть умови, за яких відбувається взаємодія двох провідників, та вкажіть силу взаємодії, яка використовується для визначення «ампера».

11. Поясніть зв'язок між температурою Кельвіна та температурою Цельсія.

12. Поясніть, що являє собою похідна одиниця системи одиниць фізичних величин.

13. У чому полягає відмінність між системною та позасистемною одиницею фізичної величини?

14. Через які причини поділ вимірювань на статичні та динамічні є умовним?

15. Чим відрізняються між собою основні та похідні одиниці, які формують собою систему одиниць загалом?

16. Чому саме когерентності похідних одиниць є важливою вимогою для побудови системи одиниць?

17. Що називають процесом, а що – полем, у контексті залежності фізичної величини від часу та координат простору?

18. Що таке розмір фізичної величини? Чому не слід використовувати термін «величина» у якості кількісної характеристики властивості?

19. Що таке фізична? Наведіть декілька прикладів фізичних величин.

20. Що являє собою метрологічна суть вимірювання?

21. Що являє собою система величин?

22. Що являють собою «узаконені одиниці» та як вони пов'язані із системою одиниць фізичних величин?

23. Як класифікуються фізичні величини за критерієм змінності?

24. Яка ключова відмінність між додатковими й позасистемними одиницями та основними і похідними одиницями цієї системи.

25. Яка принципова відмінність між неперервними та дискретними фізичними величинами.

26. Яке числове значення присвоєне одиниці фізичної величини та чому саме так?

27. Яке явище використовують для визначення основної одиниці «секунда»?

28. Який чинник є визначальним для проведення сукупних або спільних вимірювань?

29. Які вимоги прийнято враховувати під час вибору основних величин та розмірів їх одиниць для побудови системи?

30. Які додаткові одиниці (окрім основних, похідних та десяткових кратних і часткових) застосовують в Україні та за якої умови?

ТЕМА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

План:

- 3.1 Використання фізичних ефектів в інформаційних системах.
- 3.2 Закономірності проявлення фізичних ефектів.
- 3.3 Закономірності технічної реалізації фізичних ефектів.
- 3.4 Особливості побудови фізичних схем.
- 3.5 Бази даних фізичних ефектів.

3.1 Використання фізичних ефектів в інформаційних системах

Фізичні ефекти (ФЕ) – це фундаментальні знання, які систематизовано та накопичено людством. Термін «фізичний ефект» широко використовується як науковій, так і технічній літературі. Однак його визначення немає ні у фізичних, ні в інших енциклопедіях та словниках. Це призводить до того, що дослідники та розробники методів вирішення технічних завдань, в основу яких покладено використання того або іншого ФЕ, формують різні тлумачення цього терміну. У каталоги ФЕ включають таку інформацію, яку не можна приймати за опис окремих ФЕ (наприклад, трансформатор, магнітний підсилювач, коливання струни, зварювальна дуга, тощо). Такого роду тлумачення ФЕ призводить до методологічних помилок. Окрім цього, відсутність чіткого визначення ФЕ унеможливорює формалізацію вирішення технічних завдань.

Для однозначності тлумачення ФЕ було прийнято вважати, що він є результатом впливу одних фізичних об'єктів на інші, які за певних умов взаємодії спричиняють конкретні зміни значень фізичних величин. Однак таке формулювання не враховує поняття «вплив» і не розкриває його. Окрім цього, термін «фізичний ефект» ототожнюється лише зі зміною значень, яка притаманна взаємодії фізичних величин, що істотно обмежує коло відомих у матеріальному світі явищ.

Враховуючи те, що ФЕ, за своїм змістом, є результатом (наслідком) деякої взаємодії матеріальних об'єктів, то під «фізичним ефектом» варто розуміти закономірність прояву результатів взаємодії об'єктів матеріального світу, які проявляються за допомогою фізичних полів. При цьому закономірність проявлення характеризується послідовністю та повторюваністю за ідентичних умов взаємодії.

Різноманітність процесів і явищ, які відбуваються у природі, зумовлена

наступними типами взаємодії: всесвітнім тяжінням; електромагнітними, ядерними та слабкими впливами. Кожному типу взаємодії відповідають конкретні фізичні поля. Кожне з них має низку характеристик або модифікацій, які й зумовлюють особливості взаємодії матеріальних об'єктів (наприклад, електричне поле може бути статичним, змінним, вихровим, тощо). Все це створює умови для прояву великої кількості різноманітних ФЕ.

Виходячи із визначення ФЕ необхідно надати характеристику впливу, об'єкта матеріального світу (фізичний об'єкт) та результату взаємодії (ефект).

Взаємодія (вплив) – це фізичне поле або його модифікація, носієм якого є фізичний об'єкт. У подальшому фізичні поля взаємодії варто розглядати окремо від фізичних об'єктів, складовою частиною яких вони є. Зазвичай взаємодія постійно спрямована на деякий фізичний об'єкт та прикладена до нього.

Фізичний об'єкт – це окремих елемент або сукупність взаємозалежних елементів, які утворюють певну структуру. До фізичних об'єктів належать , які складаються із макротіл (елементи конструкцій), макротіла (речовини, матеріали, кристали, рідини, тощо), мікротіла (молекули, атоми, іони, тощо) та елементи мікротіл (електрони, нейрони, протони, частинки, тощо).

Результат взаємодії (впливу) – це той ефект, який проявляється на фізичному об'єкті або в навколишньому середовищі. Результатом впливу є те ж фізичне поле, яке відноситься до взаємодії. До результатів взаємодії варто також віднести зміну параметрів фізичних об'єктів (розмірів, форми, агрегатного стану, тощо).

Виявлення взаємодії та їх результатів у ФЕ – це встановлення можливих відносин між ними. Виходячи із визначення ФЕ, взаємодії (впливу), фізичного об'єкта та результату взаємодії кожен ФЕ можна подати у вигляді моделі чорного ящика (рис. 3.1).

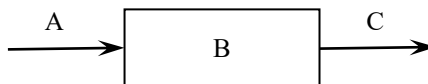


Рисунок 3.1 – Модель чорного ящика фізичного ефекту
А – вплив, В – фізичний об'єкт, С – результат впливу (ефект)

Функціонування будь-якого технічного засобу (ТЗ) засноване на проявленні тих або інших ФЕ. Сукупність взаємопов'язаних ФЕ формує фізичну основу ТЗ.

3.2 Закономірності проявлення фізичних ефектів

3.2.1 Стадії прояву фізичних ефектів

На практиці, прояв фізичних ефектів прийнято поділяти на наступні стадії:

1. Фізичні ефекти виявляються під час переходу фізичної системи або її елементів з одного стійкого стану в інший. Наприклад, усі фотоелектричні явища обумовлені порушенням рівноваги між системою електронів, з одного боку, і атомом, молекулою або кристалічною решіткою – з іншого. Нерівноважений стан електронної системи тіла зберігається деякий час після поглинання фотона, протягом якого можуть спостерігатися фотоелектричні явища. Потім надмірна енергія електронів розсіюється і в тілі встановлюється рівновага.

2. Прояв ФЕ відбувається у три стадії: початкова стадія (пов'язана із прикладенням взаємодії); вплив, який встановився під час проявлення результату взаємодії; припинення (зняття) взаємодії.

Даний прояв ФЕ зумовлено наступними чинниками:

- реакцією на взаємодію з боку фізичного об'єкта (вона проявляється як по відношенню до зовнішніх впливів, так і до взаємодії між ФЕ його складових;
- акумулюванням фізичним об'єктом деякої частини енергії взаємодії, яка проявляє себе після припинення впливу;
- часом протікання процесів на рівні структурних елементів фізичного об'єкта.

3. Вплив та результат взаємодії можуть бути значно розділені у часі. Ця закономірність проявлення ФЕ пов'язана з тим, що у фізичному об'єкті в тому або іншому вигляді накопичується енергія впливу, яка через деякий час виділяється у вигляді впливу та передається об'єктам навколишнього середовища. Усі форми накопиченої енергії можна пов'язати із деякими видами зсувів, з перегрупуванням, деформаціями якихось частин системи та іншими перетвореннями.

Момент початку проявлення результату впливу може стимулюватися зовнішньою взаємодією після зняття основного впливу (наприклад, ефект лазерного випромінювання, тощо).

На практиці відомі такі ФЕ, у яких зовнішній вплив прикладається на стадії докладання основного впливу (електретний ефект), а у деяких ФЕ зовнішня взаємодія прикладається раніше за основний вплив (ефект ультразвукового зміцнення матеріалу).

3.2.2 Закономірності прикладання взаємодії

Щодо закономірності прикладання впливу ФЕ, то їх є три:

1. На один фізичний об'єкт прикладено декілька впливів. Взаємодія (ефект Хола, ефект Відемана, магніторезистивний ефект, магнітоакустичний резонанс), яка прикладена до фізичного об'єкту володіє принциповими відмінностями:

одна забезпечує проявлення ефекту (основна), а інші – впливають лише на величину проявленого ефекту (додаткові). Таким чином, додатковий вплив призводить лише до кількісної зміни результату, який формується під дією основної взаємодії. У якості додаткових впливів виступають постійнодіючі, які притаманні для будь-яких фізичних об'єктів навколишнього середовища (наприклад, теплові, магнітні, силові та електричні поля). При цьому сам додатковий вплив не може формувати результат взаємодії.

2. Різні типи впливів можуть створювати один і той же результат взаємодії. На практиці електричний потенціал можна отримати під час взаємодії на фізичний об'єкт силовим впливом (п'єзоелектричний ефект), звуковим полем (акустоелектричний ефект), світловим випромінюванням (фотоелектричний ефект), тепловим полем (ефект Зеєбека), магнітним полем (ефект магнітної індукції) тощо. Дана закономірність ґрунтується на використанні фізичних об'єктів, які мають різну структуру та властивості структурних елементів.

Для проявлення п'єзоелектричного ефекту використовують матеріали із кристалічною структурою, при цьому кристали не мають центру симетрії, а для проявлення акустоелектричного ефекту – метали і напівпровідники, до складу яких входять електрони провідності.

3. Під час збільшення часу впливу проявлення ФЕ припиняється. Дане явище притаманне тим ФЕ, у яких у якості взаємодії виступає змінне фізичне поле (наприклад, у п'єзоелектричному та акустоелектричному ефектах, в ефекті рекомбінаційної люмінесценції через розмоктування електричних зарядів не виникає потенціалу електричного поля).

3.2.3 Закономірності проявлення результатів взаємодії

Закономірність проявлення результатів взаємодії полягає в наступному:

1. Під час одного впливу на об'єкт спостерігається одночасно декілька різних результатів взаємодії.

Кількість результатів впливу залежить від структури фізичного об'єкта. Чим менш складний за своєю структурою фізичний об'єкт, тим менше результатів взаємодії на ньому проявляється. Зміна числа та складу структурних елементів призводить до того, що за заданого впливу можна отримати необхідний результат взаємодії, змінювати числові значення співвідношень між результатами впливів.

Виділення (виокремлення) структурних елементів фізичних об'єктів доцільно використовувати у ході фізичного аналізу процесів, які відбуваються у ТЗ під час синтезу фізичних об'єктів із заданими властивостями; під час виявлення проявлених на фізичному об'єкті результатів наявного впливу, тощо.

Внутрішній вплив та її результат широко використовуються в техніці та

технологічних процесах (наприклад, для нагрівання заготовки застосовано піч (зовнішнє теплове вплив), а електричний струм, який пропускається через неї є її внутрішньою тепловою взаємодією).

Коливання елементів механічної системи може бути викликано зовнішнім силовим впливом, або за рахунок внутрішніх процесів, викликаних взаємодією змінного магнітного поля (МП).

2. Величина результату впливу може регулюватися.

Це зумовлено наступними чинниками:

– кількісною зміною впливу (наприклад, збільшення навантаження призводить до збільшення деформації (ефект Гука); збільшення потенціалу електричного поля (ЕП) призводить до збільшення деформації (зворотний п'єзоелектричний ефект); збільшення освітленості призводить до збільшення електричного струму в ланцюзі (фотоефект), тощо);

– введенням додаткової взаємодії (наприклад, гальваноманітного ефекту; магнітопружного ефекту, тощо). При цьому анод варто розглядати як спосіб керування процесом передачі енергії або її перетворенням. Зовнішня взаємодія від додаткового впливу, зазвичай, не використовується. Істотним є лише внутрішній механізм взаємодії структурних елементів фізичного об'єкта, який забезпечує необхідний рівень керування результатом впливу;

– введенням ще одного основного впливу (наприклад, ефекту електропластичної деформації: $A^1_{\text{осн}}$ – яка деформує метал; $A^2_{\text{осн}}$ – потенціал ЕП, який забезпечує протікання електричного струму через зону деформації металу. МП яке при цьому виникає змінює орієнтування структурних елементів металу);

– зміною структури фізичного об'єкта (наприклад, гігантський магніторезистивний ефект отриманий в результаті переходу від фізичного об'єкта, який володіє моноструктурою, до фізичного об'єкта у вигляді надрешітки, яка являє собою періодичне чергування магнітних і немагнітних шарів товщиною в кілька атомних площин);

– зміною параметрів фізичного об'єкта (наприклад, збільшенням освітлюваної поверхні (фотоефект); підвищенням чистоти обробки поверхні (ефект змочування); вибором геометричної форми каналів (звукокапілярний ефект), тощо).

3. За умови сталості умови впливу та властивостей фізичного об'єкта проявляються одні й ті ж результати взаємодії, одні й ті ж значення їх параметрів. Ця закономірність обумовлена стабільністю структури фізичного об'єкта, на який здійснюється вплив, і стабільністю властивостей елементів його структури (наприклад, для електрона характерна стабільність величини заряду; для кварцу – стабільність кристалічної решітки; для напівпровідникового

матеріалу – стабільність геометричних параметрів зон провідності, тощо). Ця закономірність покладена в основу стабільності показників якості усіх ТЗ, прогнозування поведінки ТЗ, управління ними.

4. Інерція під час прояви результату впливу та його проявленні. Постулат Максвелла говорить: миттєвої передачі дії одного тіла на інше не існує. У природі немає жодного ФЕ, який може проявився у той же ж момент часу коли до фізичного об'єкту прикладають вплив. Варто говорити лише про швидкодію тієї чи іншої ФЕ (наприклад, ефект теплопровідності більш інерційний, у порівнянні із ефект звукопровідності). Затримка у часі проявлення результату взаємодії пов'язана із тими процесами, які відбуваються під час енергообміну між структурними елементами фізичного об'єкта. Результат впливу проявляється протягом визначеного часу після зняття впливу.

Інерційність проявлення фізичного ефекту переноситься в технічний засіб елементами які проявляється у ФЕ. Параметр швидкодії ТЗ напряму пов'язаний з інерцією проявлення ФЕ, які покладено у їх основу.

3.3 Закономірності технічної реалізації фізичних ефектів

3.3.1 Закономірності трансформації фізичних ефектів у технічні рішення

Розвиток техніки та технологій нерозривно пов'язаний із використанням фундаментальних ФЕ. Кожен винахід є технічною реалізацією певної природної закономірності.

Ото ж, фізичний ефект – це спостережуване, вимірюване кількісно явище, яке виникає під час взаємодії матерії та енергії. Технічна реалізація – це процес перетворення цього природного ефекту на функціональний, надійний та ефективний пристрій або систему, які здатні вирішувати прикладні завдання. Розуміння закономірностей цього переходу є ключовим для інженерної діяльності.

Процес перетворення фізичного ефекту на технічне рішення проходить декілька етапів, які й забезпечують його ефективне втілення:

1. Етап фундаментального дослідження (наукова стадія). На цій стадії відбувається виявлення та всебічне кількісне дослідження ФЕ. Створюється математична модель, яка дозволяє описати поведінку явища та його залежність відносно певних умов (температури, тиску, електричного чи магнітного поля), що дозволяє прогнозувати результат і масштабувати ефект.

2. Етап концепції та принципу дії (інженерна стадія І). Після отримання моделі інженери ведуть пошук корисної функції ефекту. Створюється принципова схема пристрою. Тут діє закономірність оптимізації перетворення – створення такого пристрою, де фізичний ефект використовується для вирішення

конкретного прикладного завдання (перетворення п'єзоефекту на сенсор тиску).

2. Етап матеріально-технічного втілення (інженерна стадія II). Це етап практичної реалізації та вибору матеріалів. Ключові закономірності пов'язані із вибором матеріалу, в якому фізичний ефект проявляється максимально ефективно та стабільно, а також з технологічністю його виготовлення. На цьому етапі розпочинається робота із мінімізації паразитарних (небажаних) ефектів, таких як теплові втрати.

Ефективність технічної реалізації значною мірою залежить і від внутрішніх закономірностей прояву ФЕ у фізичних об'єктах, зокрема:

1. Закономірність багатофункціональності об'єкта. На одному фізичному об'єкті від різних впливів можна виявити різні фізичні ефекти. Це фундаментальна закономірність, яка забезпечує багатофункціональне використання матеріалів та структурних елементів у технічних засобах.

Приклад: сталевий стержень – це простий фізичний об'єкт, але для нього притаманні:

- ефект теплового розширення (при зміні температури);
- ефект Гука (пружна деформація від механічного навантаження);
- ефект електропровідності (пропускання електричного струму);
- ефект намагнічування (прояв магнітних властивостей у зовнішньому полі);
- ефект звукопровідності (передача акустичних хвиль).

Завдяки цій закономірності один і той же структурний елемент може одночасно виконувати свою основну функцію та бути давачем або актуатором, реагуючи на зміну фізичного поля.

2. Закономірність сумісного прояву та взаємодії ефектів. На одному фізичному об'єкті одночасно можуть виявлятися й декілька фізичних ефектів. Можливість одночасного прояву декількох ФЕ зумовлена наявністю в такому об'єкті різноманітних структурних елементів (атомна ґратка, вільні електрони, домени), які незалежно/спільно беруть участь у проявленні різноманітних явищ. Це може бути викликано дією як одного (наприклад, електричний струм викликає і тепловий ефект, і магнітний ефект), так і декількох впливів.

Взаємодія ефектів – ФЕ, які з'являються одночасно, відповідно й впливають один на одного. Результати цієї взаємодії:

- –схожі (адитивні): наприклад, теплове розширення матеріалу та деформація, яка виникла під час прикладання зовнішніх механічних навантажень. При цьому ці ефекти впливають на зміну розміру об'єкта;
- різні (антагоністичні або комплексні): наприклад, термоелектричний ефект (створення напруги від різниці температур) супроводжується ефектом

Джоуля-Ленца (нагрівання від протікання струму), що ускладнює його керування.

Одночасне проявлення декількох ФЕ на одному об'єкті є потужною передумовою для багатофункціонального використання структурних елементів ТЗ, але вимагає, при цьому, ретельного інженерного розрахунку їх взаємодії.

Закономірності масштабування та обмеження:

1. Закономірність масштабування (Scale Law). Більшість ефектів, лінійних на мікрорівні, стають нелінійними під час масштабування. Інженерна робота зводиться до оптимізації відношення корисного ефекту відносно теплових або інших паразитарних втрат, які зростають непропорційно у ході збільшенні розмірів або потужності.

2. Закономірність компромісу (Trade-offs). У технічній реалізації завжди присутня закономірність компромісу між протилежними вимогами: точність проти швидкості, ефективність проти вартості, потужність проти розміру. Інженерна майстерність полягає у пошуку оптимальної точки компромісу, яка найкраще задовольняє вимогам технічного завдання.

3.3.2 Конструктивно-технологічні закономірності

Більш детальний розгляд технічних схем (ТС), які відносять до різних типів (класів) і в основу яких покладено різне призначення (варіант технічної реалізації окремих ФЕ) дозволяє визначити відповідні закономірності їх технічної реалізації.

На нижньому рівні ієрархії ТС її елементи виступають фізичними об'єктами, на яких проявляються ФЕ, які й становлять її фізичну основу. При цьому кожен елемент системи подають у вигляді деякого фізичного об'єкта, який піддається сторонньому впливу з боку інших елементів технічної схем або навколишнього середовища.

У ході технічної реалізації ФЕ фізичного об'єкту надають певна геометричну форму.

Використання ФЕ в ТС вказує на те, що параметри результату впливу істотно залежать від геометричної форми фізичного об'єкта, на якому проявляється той або інший ФЕ. Така залежність формує модель ФЕ. Отже, для кожного ФЕ притаманний лише свій набір елементів різної геометричної форми, що забезпечує максимальний прояв результату впливу. Якщо проявляється декілька результатів взаємодії, то слід вибирати лише ті об'єкти або його геометричні характеристики, у яких забезпечується максимальний прояв застосованого результату взаємодії та мінімальний вплив незастосованих результатів взаємодії, чим забезпечується максимальна передача енергії від одного ФЕ до іншого у ланцюгові ФЕ.

Фізичний об'єкт визначеної геометричної форми прийнято називати

структурним елементом.

Під час вибору геометричної форми об'єкта відбувається перехід від найменувань фізичних об'єктів (речовин, матеріалів) до узагальнених назв конструктивних елементів, які визначаються із урахуванням їх геометричних характеристик. Такі назви є загальноприйнятими, використовуються під час опису об'єктів техніки, використовуються у ході вибору найменувань деталей або вузлів у системі конструкторської документації (елементи при цьому не мають своїх геометричних розмірів, а характеризуються лише їх співвідношенням).

Фізичному об'єкту визначеної геометричної форми надають просторову прив'язку впливів та результатів взаємодії.

Вибір конкретної геометричної форми фізичного об'єкта напряму пов'язане із вибором просторової прив'язки до неї як впливу ($A_{осн}$, $A_{дод}$), так і результату взаємодії (C). Лише за цієї умови буде забезпечено отримання максимального результату. Точкою прикладання впливу або результату взаємодії може бути ділянка в середині об'єкта, будь-яка частина його поверхні або частина навколишнього середовища, яка взаємодіє із об'єктом. Так у ФЕ виникнення електричного струму під дією електричного поля останнє може бути прикладене до фізичного об'єкта (тверде тіло довільної форми: точки, лінії, поверхні, всередині та зовні його поверхні). При цьому відстань між точками прикладання потенціалу та площею їх поперечного перетину не дорівнює нулю.

Для опису просторових точок прикладення впливу, проявлення результату взаємодії, їх взаємного розташування та напрямів користуються системою координат, яка прив'язується до геометричної форми фізичного об'єкта.

Геометрична характеристика фізичного об'єкта, просторовий опис застосування впливу та результату взаємодії дозволяють сформувати математичну модель структурного елемента:

$$C=f(P_a, P_c, P_f),$$

де P_a – вектор параметрів прикладеного впливу;

P_c – вектор параметрів прикладеного результату взаємодії;

P_f – вектор параметрів геометричної форми.

Технічно, одні і ті ж ФЕ, можна реалізувати на об'єктах, які перебувають у різних агрегатних станах (електропровідність може з'являється у твердих тілах, рідинах, газах та плазмі).

Деяким ТС притаманно, що один і той же ФЕ може проявляється на

фізичному об'єкті, який переходить одноразово або багаторазово із одного агрегатного стану в інший (деякі типи запобіжників, теплові трубки, тощо).

Прояв одного і того ж ФЕ на фізичних об'єктах, які знаходяться у різних агрегатних станах, дозволяє легко використовувати їх у поєднанні з іншими ФЕ, які не мають таких можливостей.

3.3.3 Закономірності реалізацій функцій технічних систем

Вплив A_n та результат взаємодії C_n деякого FE_n у сукупності характеризують функцію, яку він може реалізувати у складі ТЗ.

Множина ФЕ дозволяє скласти список функцій, які можна реалізувати. Зазвичай, до переліку таких функцій входять узагальнені функції (нагрівання, розширення, коливання, електризація, переміщення, світлове випромінювання, тощо).

Число функцій, які безпосередньо виконуються ФЕ, є значно меншими у порівнянні із кількістю функцій, які виконуються ТС та їх структурними елементами. Це пояснюється тим, що ТС виконують здебільше конкретні, цільові функції, хоча їх виконання ґрунтується на використанні одного і того ж ФЕ. Враховуючи це, під час вибору ФЕ або сукупності взаємозалежних ФЕ для реалізації тієї або іншої цільової функції необхідно володіти інформацією про ієрархічну структуру функцій. Зазначимо, що остання може бути подана у вигляді дерева функцій або ієрархічного словника.

На практиці використовують наступні закономірності для реалізації функцій ТС:

- одна і та ж функція системи може бути реалізована за допомогою різних ФЕ, які належать до різних груп (функції нагрівання, переміщення, провідності, тощо);

- одна і та ж функція об'єкта техніки може бути реалізованою як за допомогою одного ФЕ, так і сукупністю взаємозалежних ФЕ (функція перетворення електричної енергії в електромагнітне випромінювання, а також ланцюга взаємопов'язаних ФЕ в люмінесцентній лампі);

- ФЕ або групи взаємопов'язаних ФЕ, які забезпечують реалізацію конкретних функцій, що технічно реалізуються у вигляді типових структурних елементів ТС (функції накопичення, поглинання, нагрівання, випромінювання, тощо).

3.3.4 Закономірності взаємозв'язку фізичних ефектів

Здебільшого ТС відносять до складних ієрархічних систем, які характеризуються множиною структурних елементів та зв'язків між ними. Функціонування таких ТС базується на проявленні великої кількості взаємопов'язаних ФЕ.

Кожен структурний рівень системи є середовищем, де одночасно діє поле ФЕ. Ці ефекти не існують ізольовано, а формують складну мережу взаємодій.

3.4 Особливості побудови фізичних схем

3.4.1 Фізична схема як інструмент синтезу технічних рішень

В інженерній практиці використовуються різноманітні види та типи схем. За видами елементів, що входять до складу виробу, схеми традиційно поділяються на електричні, гідравлічні, пневматичні та кінематичні. У документації на складні системи ці схеми можуть бути представлені комплексно. Кожна з них об'єднує елементи певної фізичної природи. Якщо ж поділ на окремі види є недоцільним, застосовуються змішані схеми. За типами схеми класифікуються на структурні, функціональні, принципів (повні), з'єднань (монтажні) та інші. Спільними ознаками для всіх цих схем є наявність структурних елементів та взаємних зв'язків між ними.

Виходячи з цього фізична схема (ФСх) являє собою графічне зображення ланцюгів із фізичних ефектів (ФЕ) різної фізичної природи, де реальні фізичні об'єкти представляють у вигляді умовних позначень. Кожен елемент ФСх є умовним позначенням узагальненої схеми ФЕ і має своє чітке функціональне призначення. Як бачимо, ФСх дає чітку уяву про ланцюг перетворень вхідних параметрів системи у вихідні, які фактично відбуваються або мають відбутися у виробі. Для синтезу ФСх зазвичай використовують інваріантні елементи, тобто ті, які зберігають свою сутність незалежно від конкретного класу технічних об'єктів.

Ключова відмінність ФСх від, наприклад, електричних схем, полягає в тому, що ФСх дозволяє відображати різні перетворення енергії (сигналу), а не лише одного її виду. Для цього випадку ФСх має більше спільного із функціональними схемами. Проте елементи ФСх належать до найнижчого рівня ієрархії – фізичного рівня. Це робить ФСх більш детальною, ніж принципова схема, де елементами можуть бути складні технічні об'єкти, функціонування яких, насправді, ґрунтується на використанні цілого ряду ФЕ, що дозволяє поділяти їх на групами ФЕ: гідравлічні, кінематичні, теплофізичні тощо.

Як бачимо ФСх характеризує виріб або його структурні елементи саме на фізичному рівні. Багато важливих елементів технічної системи, таких як давачі та перетворювачі, можна повноцінно охарактеризувати та спроектувати лише за допомогою ФСх. Важливою складовою фізичної схеми є специфікація, яка містить деталізовану інформацію: номери ФЕ (за довідником), їх найменування, найменування впливів та результатів впливів за кожним із ФЕ, а також найменування фізичних об'єктів.

Розробка ФСх є одним із ключових етапів проектування виробів. Виділення елементів на найнижчому ієрархічному рівні забезпечує широкий підхід до синтезу структури, дозволяючи інженерам створювати більш ефективні вироби за рахунок використання нових ФЕ або нових, нетрадиційних комбінацій вже відомих ефектів. ФСх, по суті, відбиває фізичну здійсненність запропонованого технічного рішення. Крім того, введення поняття «фізична схема» упорядковує термінологію в методології синтезу фізичної основи технічних систем, де часто використовуються нечіткі терміни, як-от принцип дії, принципове рішення або принцип роботи.

3.4.2 Типологія фізичних ефектів та їх функціональне відображення у ФСх

За характером проявлення ФЕ утворюють такі групи: ФЕ – провідник; ФЕ – модифікатори; ФЕ – перетворювачі енергії та ФЕ – перетворювачі фізичних об'єктів.

Перша група. ФЕ пов'язані із провідністю певного виду енергії (наприклад: електропровідність, світлопровідність, звукопровідність, тощо). Узагальнена схема ФЕ цієї групи подана на рисунку 3.2.

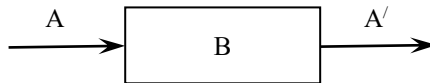


Рисунок 3.2 – Узагальнена схема фізичних елементів першої групи

ФЕ цієї групи використовуються для забезпечення взаємозв'язків між фізичними об'єктами, на яких виявляються ФЕ-перетворювачі. Наприклад, ФЕ електропровідності досить широко застосовуються в електротехніці, обчислювальній та електронній техніці та інших галузях.

Ефекти провідності проявляються на різних ієрархічних рівнях фізичних об'єктів. Наприклад, ефект електропровідності проявляється на макрорівні (мікросхеми) і на макрорівні (лінії електропередачі).

Ефекти провідності з додатковими впливами застосовують для управління проявлення ФЕ-перетворювачів і підсилення перетворювальних впливів (вхідних параметрів ТЗ).

На рисунку 3.3 подано фізичну основу ТЗ, яка здійснює перетворення деякого вхідного параметра A_1 у вихідний C_2 . На рисунку 3.4 показано фізичну основу цього ж ТЗ з керуючим FE_3 , а на рисунку 3.5 – з FE_3 -підсилювачем.

Друга група. ФЕ, які пов'язані із модифікацією результатів взаємодії по відношенню до впливу без перетворення одного виду енергії в інший (наприклад, ефект заломлення звукових хвиль; ефект фокусування та

дефокусування світла; поляризації, тощо).

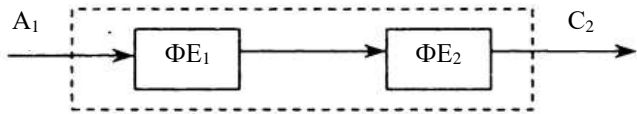


Рисунок 3.3 – Фізична основа технічного засобу

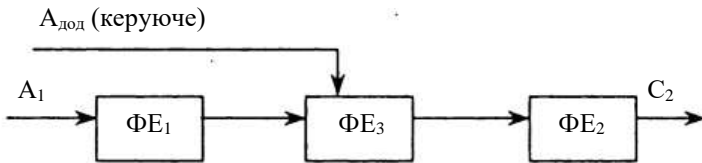


Рисунок 3.4 – Фізична основа технічного засобу з керуючим FE3

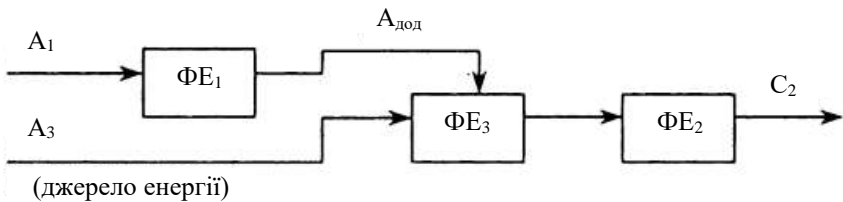


Рисунок 3.5 – Фізична основа технічного засобу з підсилювачем FE3

Узагальнену схему ФЕ цієї групи наведено на рисунку 3.6.

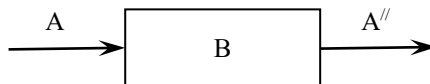


Рисунок 3.6 – Узагальнена схема фізичних елементів другої групи

ФЕ цієї групи використовуються для узгодження результатів впливу та взаємодії у двох взаємопов'язаних ФЕ. При цьому результат впливу та взаємодія є різновидами одного і того ж фізичного поля й відрізняються лише характеристиками. Крім того, вони можуть використовуватися для модифікації характеристики результату впливу кінцевого, у ланцюзі перетворень, ФЕ або характеристики взаємодії у першого ФЕ.

Для кожного фізичного поля можна скласти список характеристик. Ці

списки, в переважній більшості, будуть перетинатися один з одним.

Третя група. У природі не існує такого фізичного поля, яке б не мало взаємозв'язків, у вигляді ФЕ, з іншими полями. Такі ФЕ пов'язані з перетворенням одного виду енергії в інший. Незважаючи на невелику кількість видів енергії, дана група ФЕ досить численна, що визначається великою кількістю модифікацій ефектів (наприклад, фотоелектричний ефект; термоелектричний ефект; акустомагнітний ефект, тощо).

Узагальнену схему ФЕ цієї групи наведено на рисунку 3.1.

ФЕ цієї групи є найбільш складними за своєю фізичною структурою.

Розглянемо наступні ФЕ: акустоелектричний, п'єзоелектричний та фотовольтаїчний. Наведені ФЕ володіють різною взаємодією, але однакові за результатом впливу – електричне поле (ЕП). Вони забезпечують перетворення одного виду енергії на інший.

На рисунках з 3.7 по 3.9 наведено схеми таких ФЕ на 2-му рівні ієрархії.

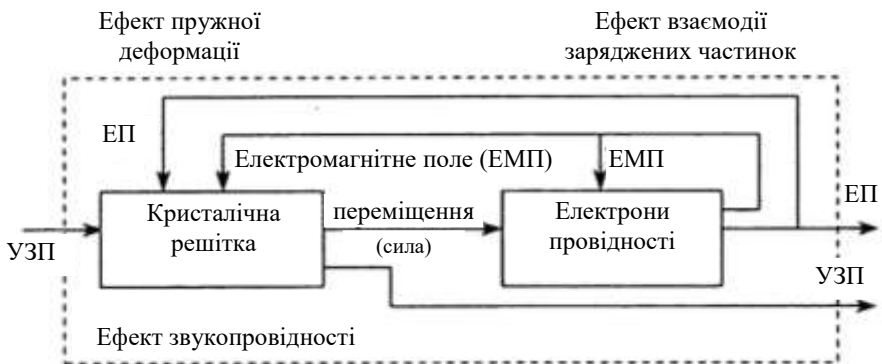


Рисунок 3.7 – Акустичний ефект

Під час проявлення акустоелектричного ефекту під дією ультразвукового поля (УЗП) виникають коливання кристалічної решітки, які розглядаються як хвилі пружної деформації. Відбувається обмін енергією та імпульсом між хвилями та електронами провідності. Передача енергії від хвилі до електронів призводить до додаткового поглинання УЗП, а передача імпульсу від хвилі до електронів – до зміни їх концентрації та появи ЕП.

У п'єзоелектричному ефекті до прикладання впливу центри ваги позитивних і негативних зарядів (іонів, електронів) збігаються – електричні позитивних і негативних зарядів (іонів, електронів) збігаються – електричні дипольні моменти компенсують один одного. Вплив (розтягування, стискання)

шляхом деформування кристалічної решітки змінює довжини зв'язків між зарядами кожної групи – електричні дипольні моменти один одного не компенсують. З'являється потенціал ЕП.

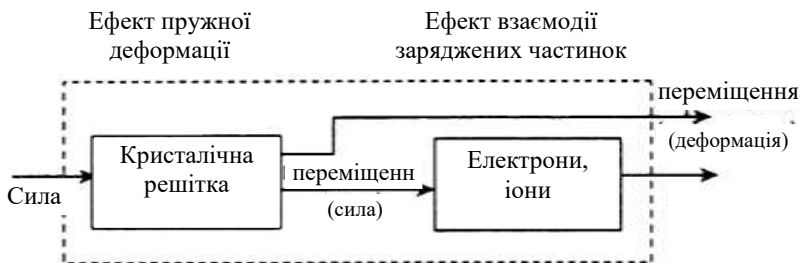


Рисунок 3.8 – П'єзоелектричний ефект

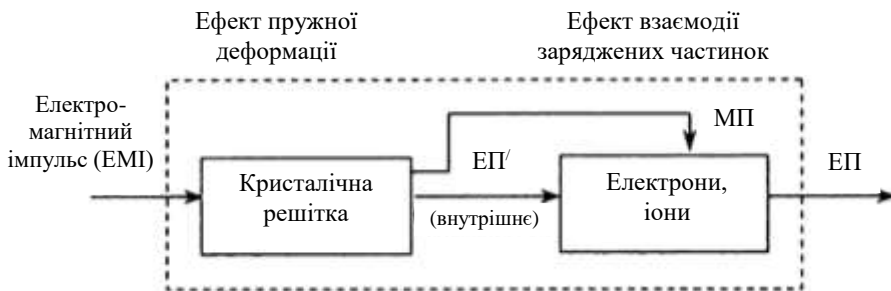


Рисунок 3.9 – Фотовольтаїчний ефект

У фотовольтаїчному ефекті відбувається поглинання електромагнітного випромінювання в напівпровіднику, що зумовлює генерування носіїв заряду та їх просторовий поділ. Поділ носіїв та поява ЕП відбувається під час їх дифузії та дрейфу у внутрішньому електричному й магнітному полях через нерівномірну генерацію носіїв заряду та неоднорідності кристала.

Спільним, для усіх трьох ФЕ, у фізичному об'єкті структурних елементів є носії заряду. Вони є носіями ЕП. До застосування впливу поля цих структурних елементів не мали зовнішнього прояву. Оскільки впливи у цих ФЕ відрізняються один від одного (УЗП, сила, ЕМІ), то для забезпечення взаємодії із зовнішнім впливом використовуються різні фізичні об'єкти, які містять у собі відповідні цим впливам структурні елементи.

Таким чином, проявлення ФЕ, які забезпечують перетворення одних

фізичних полів в інші, обумовлюється наявністю у їх складі двох типів структурних елементів: структурних елементів, які взаємодіють із зовнішнім впливом, і структурних елементів, які володіють фізичним полем, яке відповідає результату впливу.

Перетворення одного фізичного поля в інше не спостерігається. У даному випадку відбувається передача лише енергії від одного фізичного поля до іншого через відповідні структурні елементи-носії. Отже, відбуваються зміни у взаємозв'язках між структурними елементами.

Четверта група. ФЕ, які пов'язані із перетворенням фізичного об'єкта, та може проявлятися у наступному:

- зміна фізичних властивостей: прозорість, текучість, температура, намагніченість, тощо;
- зміна структури: кристалізація, перехід від однієї кристалічної структури до іншої, перетворення одних хімічних сполук в інші, тощо;
- зміна агрегатного стану: плавлення, конденсація, сублімація, випаровування, тощо;
- зміна складу структурних елементів: розподіл і синтез молекул, атомів, ядер атомів, тощо;
- зміна фізичного об'єкту відбувається дискретно (заміна одного фізичного об'єкта на інший) та безперервно (зміна концентрації розчинів, тиску газів, складу газів, тощо).

Зміна властивостей фізичного об'єкта впливає лише на прояву інших ФЕ на ньому.

3.5 Бази даних фізичних ефектів

Розвиток інженерії та технологій нерозривно пов'язаний із використанням фундаментальних ФЕ. Кожен винахід є технічною реалізацією певної природної закономірності. Однак інформація про ФЕ історично розсіяна у наукових джерелах, часто є важкодоступною та зорієнтована більш на пізнання природи, а ніж на інженерне застосування. Багато фізичних ефектів тривалий час залишаються невідомими для інженерів, що стримує розробку перспективних виробів та необґрунтовано подовжує проміжок часу від відкриття ефекту до його практичного застосування. Усунути ці недоліки можна лише шляхом створення спеціалізованих і структурованих баз даних (БД) фізичних ефектів (БД ФЕ).

3.5.1 Структура опису фізичного ефекту в базі даних

Структура опису фізичного ефекту в БД формується із урахуванням основних закономірностей прояву ФЕ, умов їх взаємозв'язку, принципів технічної реалізації та цілей інформаційного пошуку та структурного синтезу.

Опис ФЕ є комплексним і містить такі ключові розділи:

1. Найменування ФЕ. Цей розділ часто носить допоміжний характер, оскільки багато ефектів названі іменами вчених (ефект Бормана, Ноттінгама тощо) та не відображають сутності ФЕ. Існують також проблеми синонімії, коли один і той же фізичний ефект називають під різними назвами. І лише частина назв (п'єзоелектричний, терморезистивний тощо) відображає їх фізичну суть.

2. Код ФЕ. Є основним елементом для пошуку інформації. Код може нести певне інформаційне навантаження (типу впливу та результат дії).

3. Найменування та характеристика впливу. Містить найменування фізичного поля, яке впливає на об'єкт (електричне, вихрове), його різновид, а також характеристики у часі та просторі. Вказуються частини об'єкта, до яких може бути прикладена дія, параметри вимірювання та обмеження впливу. Зазначимо, що для комплексних ФЕ подається інформація про основні та додаткові впливи.

4. Найменування та характеристика результату впливу. Включає у себе найменування та різновид результату (інфрачервоне випромінювання, зміна механічних властивостей тощо). Наводяться характеристики та параметри. Вказуються частини об'єкта або навколишнього простору, де проявляється результат. Зміни самого об'єкта (форма, механічні властивості) також є цільовим результатом.

5. Схема ФЕ. Це наочне графічне зображення, яке дає уяву про кількість та типи впливів або результатів. Схема дозволяє порівнювати ФЕ між собою і використовується для графічного відображення фізичної основи виробу та функціональних взаємозв'язків його структурних елементів.

6. Опис ФЕ. Містить одну із найпоширеніших концепцій, яка здатна пояснити фізичні процеси. Ця інформація є необхідною для забезпечення аналізу та прийняття рішення щодо застосування ФЕ у конкретних умовах.

7. Умови проявлення ФЕ та зовнішні чинники-перешкоди. Дають уяву про можливу сферу застосування та вимоги до виробів, які базуються на цьому ФЕ.

8. Модель ФЕ. Характеризує взаємозв'язок впливу та результату впливу, включає взаємозалежні параметри, сукупність фізичних констант і обмежень. Зазвичай містить емпіричні залежності. Особливо важливі залежності значень параметрів результату від параметрів навколишнього середовища (температури, тиску, радіації тощо).

9. Фізичні об'єкти, у яких проявляється ФЕ. Фізичні ефекти проявляється на низці об'єктів, які можуть бути згруповані на основі схожої внутрішньої структури. Виділення структурних елементів забезпечує взаємозв'язок із базами даних речовин і матеріалів. Для найбільш характерних матеріалів наводяться

значення фізичних констант, ККД перетворення та конструктивно-технологічні характеристики. Вибір матеріалів здійснюється на основі мінімального розсіювання енергії на побічні ефекти.

10. Варіанти геометричної форми. Узагальнюється конструктивна реалізація фізичного об'єкта із просторовою прив'язкою впливів та результатів, що полегшує конструкторське опрацювання й оцінку прийнятності ФЕ.

11. Області застосування ФЕ. Наводиться інформація про практичну значимість, промислову освоєність та можливі напрямки пошуку додаткової інформації про ФЕ.

12. Приклади практичного застосування ФЕ.

13. Література про фізичну суть ефекту.

14. Література про практичне застосування ФЕ. Вона дає уяву про те, як прийнято реалізовувати ФЕ в технічному завданні.

3.5.2 Призначення та масиви інформації БД фізичних ефектів

Створення баз даних ФЕ є стратегічним завданням, та покликаний забезпечити:

- вирішення завдань інформаційного пошуку, фізичного аналізу та структурного синтезу для широкого кола об'єктів техніки;
- обслуговування широкого кола користувачів (від фахівців НДІ, КБ й виробничих підприємств до винахідників та міжнародних організацій);
- знизити витрат на НДР і ДКР за рахунок якісного опрацювання стадій розробки технічних пропозицій.

На практиці бази даних ФЕ включають наступні масиви інформації:

- список номерів ФЕ;
- перелік найменувань ФЕ;
- список найменувань впливів та їх результатів;
- список характеристик впливів та їх результатів;
- описи ФЕ;
- перелік матеріалів, речовин та їх характеристик.

Слід зазначити, що наявна в БД інформація часто є неоднорідною за своїм змістом. Для багатьох ФЕ можуть бути не визначені граничні значення параметрів, значення параметрів навколишнього середовища, або відсутні показники, як-от ККД і час перетворення. У зв'язку з цим, не вся інформація може використовуватися для кількісної оцінки ФСх за вимогами технічного завдання.

Однак, навіть мінімально відома інформація про ФЕ є надзвичайно цінною для вирішення таких завдань, як отримання всіх можливих варіантів ФСх (оцінка загальної ситуації), пошук ФСх для піонерних винаходів та

прогнозування перспективних напрямків розвитку техніки. Важливу роль при пошуку інформації відіграють закономірності перетворення та прийоми перетворення ФЕ, які дозволяють виявляти найбільш раціональні напрями пошуку та виділяти «ключові» ФЕ.

Рекомендована література: [1; 6; 7; 8; 10; 12; 14; 15].

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення фізичній схемі. У чому полягає її ключова відмінність від традиційних схем?
2. До якого ієрархічного рівня належить фізична схема?
3. Назвіть основні функціональні групи фізичних ефектів за характером їх проявлення, які використовують для побудови фізичних схем.
4. Опишіть закономірність, коли під час одного впливу на об'єкт можна спостерігати одночасно за декількома різними результатами взаємодії.
5. Основні стадії прояву фізичних ефектів.
6. Охарактеризуйте основні етапи перетворення ФЕ на технічне рішення.
7. Розкрийте суть «Закономірності масштабування» та «Закономірності компромісу» в контексті інженерної діяльності.
8. Сформулюйте закономірність інерції під час прояву результату впливу. Як ця фізична закономірність пов'язана із параметром швидкодії технічного засобу?
9. У чому полягає відмінність між адитивною та антагоністичною взаємодією фізичних ефектів?
10. Фізичні ефекти, які здатні демонструвати різні типи впливів та можуть створювати один і той же результат взаємодії?
11. Чому розділ «Найменування ФЕ» у структурі опису фізичного ефекту часто носить допоміжний характер?
12. Чому розробку фізичної схеми прийнято вважати ключовим етапом синтезу структури виробу?
13. Чому число функцій, які виконуються ФЕ, є меншим у порівнянні із кількістю функцій, які виконує ТС?
14. Що можна віднести до результату взаємодії (впливу) у ФЕ?
15. Що являє собою закономірності багатофункціональності об'єкта в технічних засобах?
16. Що являє собою фізичний ефект? Яка основна закономірність лежить в його основі?
17. Що являють собою «інваріантні елементи» у контексті синтезу ФСх?
18. Як геометрична форма пов'язана із максимізацією корисного результату та формуванням математичної моделі структурного елемента?

19. Як сукупність взаємопов'язаних фізичних ефектів пов'язана із функціонуванням технічного засобу?
20. Яка основна проблема притаманна для інформації про фізичні ефекти та як бази даних ФЕ допомагає її усунути?
21. Яка принципова відмінність між основним і додатковим впливами?
22. Яка роль геометричної форми фізичного об'єкта у технічній реалізації ФЕ за конструктивно-технологічними закономірностями?
23. Яке призначення ФЕ-модифікаторів (друга група) у ланцюзі перетворень, і чи супроводжується їх дія зміною виду енергії?
24. Який із елементів вважається основним для пошуку інформації про ФЕ?
25. Яким чином здійснюється графічне відображення фізичної ефекту об'єкта?
26. Якими чинниками регулюється величина результату впливу?
27. Які ієрархічні рівні елементів слід віднести до поняття терміну «фізичний об'єкт» у контексті ФЕ?
28. Які ключові компоненти повинна містити специфікація до ФСх?
29. Які ключові компоненти, які беруть участь у моделюванні будь-якого фізичного ефекту за допомогою моделі чорного ящика?
30. Які основні закономірності реалізації функцій технічних систем стосуються використання ФЕ.
31. Які стратегічні завдання є основними та покликані забезпечити створення баз даних ФЕ?
32. Які типи взаємодії зумовлюють різноманітність процесів та явищ у природі, створюючи, тим самим, умови для прояву великої кількості ФЕ?

ТЕМА 4. ТИПИ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ОХОРОНИ ТА БЕЗПЕКИ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

План:

- 4.1 Засіб виявлення.
- 4.2 Вибір засобу виявлення.
- 4.3 Класифікація засобів виявлення за дією фізичного впливу.
- 4.4 Характеристика засобів виявлення.

4.1 Засіб виявлення

Відколи з'явилася власність, тоді і виникла потреба її охороняти. У давнину – від диких тварин, а згодом – від усе розумніших людей. І якщо спочатку можна

було обійтися міцними дверима та замками, то зараз уже неможливо уявити систему безпеки без сучасних електронних пристроїв, які застосовуються у різних системах сигналізації.

Головним елементом системи сигналізації є засіб виявлення (ЗВ). Засіб виявлення – це прилад, який формує сигнал тривоги у момент появи об’єкта виявлення у заданій зоні, яку, на практиці, називають зоною виявлення.

Зазвичай суб’єктом виявлення (СВ) є людина. Засобом виявлення прийнято називати давачі, сповіщувачі, сигналізаційні давачі, детектори, засоби охоронної та пожежної сигналізації або сигналізатори, а сигнал тривоги – спрацюванням або спрацюванням.

Засіб виявлення складається із чутливого елемента (ЧЕ), який перетворює вплив/дію від засобу виявлення в електричний сигнал, та блоку оброблення, який здійснює аналіз цього сигналу й формує сигнал тривоги (рис. 4.1).

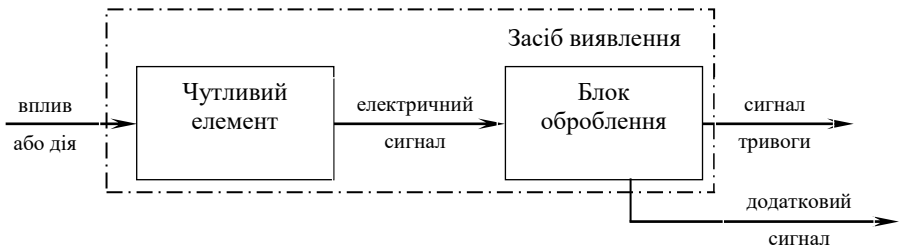


Рисунок 4.1 – Засіб виявлення

Часто, сам чутливий елемент називають «давачем». З метою уникнення неточності необхідно використовувати традиційний термін «давач» лише у тих випадках, які виключають його неоднозначне розуміння. В усіх інших – його замінюють термінами «чутливий елемент» або «засіб виявлення».

Необхідно зауважити, що засіб виявлення – це ширше поняття, у порівнянні із давачем сигналізації, оскільки воно передбачає виявлення будь-якого об’єкта.

Чутливий елемент іноді називають «сенсором» або «детектором». На практиці зустрічаються терміни «перетворювач», «первинний перетворювач» або «первинний вимірювальний перетворювач», що є характерним для вимірювальної техніки, де до вхідних елементів висувають особливі метрологічні вимоги.

Багато чутливих елементів, які застосовуються в засобах виявлення, запозичено з різних областей точного приладобудування, та й самі ЗВ, часто, не тільки виявляють об’єкт, але й вимірюють його параметри або виявляють сам об’єкт на основі оцінювання деяких параметрів.

Основне призначення засобу виявлення полягає у видачі сигналу тривоги під час вторгнення порушника в зону, яка охороняється. У тому випадку коли під час проходження порушника сигнал тривоги не буде виданий, тоді таку ситуацію прийнято називати проходженням порушника або помилкою першого роду.

Однак, не менш важливим, є те щоб ЗВ не видавав сигнал тривоги за відсутності самого порушника. За умови, коли сигнал тривоги виникає при відсутності порушника, то таку ситуацію називають хибною тривоگوю (хибним спрацюванням) або ж помилкою другого роду.

Робочий стан увімкненого давача, коли сигнал тривоги є відсутнім, але давач готовий до його видачі, називають черговим станом або черговим режимом роботи давача. При цьому, особливу складність становить той факт, що між зоною, яка охороняється (яку в ідеалі повинна повністю покривати зона виявлення давача) і зоною вільного переміщення людей часто лежить дуже вузька межа або її взагалі немає.

Окрім основного призначення засобів виявлення, від них часто очікують оцінку та видачу додаткової інформації (рис. 4.1):

- справність давача та готовність до видачі сигналу тривоги;
- наявність спроб розкриття давача з метою втручання в його роботу;
- наявність пошкодження сигнальної лінії (лінії передачі сигналів тривоги);
- відсутність живлення давача, перехід на резервне живлення або розрядження елементів живлення, що вимагає їх заміну;
- розпізнавання типу об'єкта (людина, група людей, транспорт, тварина) або зазначення напряму пересування;
- інформація про параметри об'єкта виявлення (кількості людей у групі, їх швидкість, траєкторія руху, розташування, наявності зброї);
- ступінь достовірності сформованого сигналу тривоги;
- формування додаткової інформації у вигляді аналогового сигналу (для прослуховування або перегляду оператором з метою ухвалення остаточного рішення).

Необхідно пам'ятати, що поява порушника – подія рідкісна, а засіб виявлення має бути готовим до неї у будь-який час та в будь-яких умовах. Вибір давачів, які будуть придатними для конкретних цілей застосування, можливе лише за умови повної уяви про усю різноманітність існуючих типів. Незважаючи на важливість місця, яке займає засіб виявлення в системі сигналізації, сам по собі він не в змозі вирішити жодного із завдань пов'язаних із охороною власності.

Для повного розв'язування задачі необхідною є взаємодія засобів виявлення із наступними додатковими засобами:

- засоби живлення – призначені для забезпечення тривалої безперебійної роботи ЗВ;
- засоби зв'язку – необхідні для передачі сигналів тривоги по провідниках, міським телефонним лініям або каналам стільникового зв'язку;
- засоби оброблення та відображення сигналів тривоги – необхідні для звукової та/або візуальної індикації стану давачів на пульті позавідомчої охорони, поліції, пожежної частини тощо;
- сирена або прожектор – призначені для безпосереднього впливу на порушника та запобігання його діям.

4.2 Вибір засобу виявлення

Класифікація засобів виявлення дозволяє, перш за усе, проводити обґрунтований вибір давачів, які будуть застосовуватись для конкретних цілей. Велике різноманіття таких засобів дозволяє розрізнити їх за ознаками та поділяти на типи.

За принципом дії, точніше, за характером взаємодії об'єкта виявлення з чутливым елементом, усі засоби виявлення поділяють на пасивні та активні.

Чутливий елемент пасивного ЗВ сприймає дію або випромінювання, які надходять безпосередньо від об'єкта виявлення (наприклад, механічна дія або теплове випромінювання), або природні види випромінювання, які ним розсіюються (наприклад, природне світло). Випромінювання до навколишнього середовища пасивним ЗВ не здійснюється, а відповідно передавач не можна виявити.

Чутливий елемент активного ЗВ сприймає власне штучне випромінювання після його взаємодії із об'єктом виявлення. Джерело власного випромінювання називають передавачем або випромінювачем, а у разі його розміщення в окремому корпусі – передавальним блоком. Якщо передавач та приймач випромінювання знаходяться в одному корпусі, то засіб виявлення прийнято називати однопозиційним; якщо у двох різних корпусах – двохпозиційним; якщо більш ніж у двох корпусах – багатопозиційним. У тому випадку коли необхідно зауважити, що передавальні та приймальні блоки закріплено стаціонарно, а під час роботи вони не змінюють свого положення та орієнтування, терміни «двохпозиційний» та «багатопозиційний» замінюють на «бістатичний» та «мультистатичний» відповідно. Вибір досить високої потужності випромінювача активного засобу виявлення дозволяє йому забезпечувати високу завадостійкість.

Активні засоби виявлення поділяють на дві великі групи:

- ЗВ першої групи – променеві (рис. 4.2) – постійно сприймають власне випромінювання передавального блоку, яке під час виявлення суб'єкта частково або повністю буде перекриватись;
- ЗВ другої групи – сприймають випромінювання, відбите від суб'єкта виявлення у разі його появи (рис. 4.3).

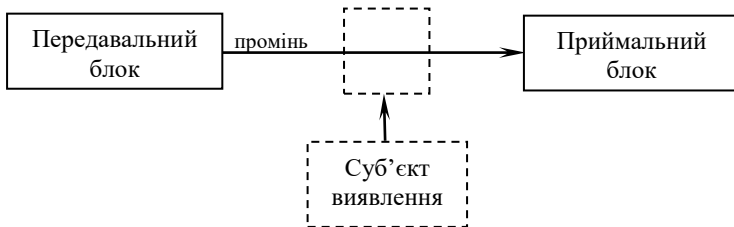


Рисунок 4.2 – Променеві активні засоби виявлення

Променеві засоби виявлення дозволяють блокувати межі об'єкту охорони довжиною до кількох сотень метрів і мають високі значення показників виявлення, оскільки на приймач надходить значна частина енергії, яка випромінюється. Однак, вони вимагають окремої лінії зв'язку як до приймача так і до випромінювача (передавача), відповідної підготовки місцевості та юстування під час встановлення та у ході їх експлуатування.

Активні засоби виявлення з відбиванням, у яких приймач та випромінювач конструктивно виконано в одному корпусі є надзвичайно зручними під час монтажу. Проте, випромінювання передавача буде використовуватись неефективно, оскільки відбита від об'єкта виявлення енергія випромінювання буде розсіюватись у просторі.

За умовами використання або місцем встановлення (монтажу) усі засоби виявлення поділяють на зовнішні та внутрішні. Зовнішні (вуличні) засоби виявлення призначені для монтажу поза приміщенням, тобто на вулиці. Внутрішні ЗВ – для монтажу всередині приміщень, які можуть бути як опалювальними, так і неопалювальними. Засоби виявлення, які призначені для опалюваних приміщень називають кімнатними.

За формою та розмірами зони виявлення давачі прийнято поділяти на: точкові; лінійні (протяжні); площинні (поверхневі); об'ємні.

Точкові ЗВ володіють невеликою зоною виявлення розміром не більше 1-2 м і призначені для охорони окремого предмета (сейфа, картини, шафи).

Лінійні ЗВ володіють зоною виявлення, яка буде сильно витягнутою в

одному напрямку, при цьому її поперечні розміри завжди менші за довжину (довжина – від декількох метрів до декількох сотень метрів; поперечний перетин – від декількох сантиметрів до декількох метрів). Цей тип давачів призначений, в основному, для охорони коридорів, ділянок периметрів об'єктів та протяжних меж. Зовнішні лінійні ЗВ називають периметровими (периметральними).

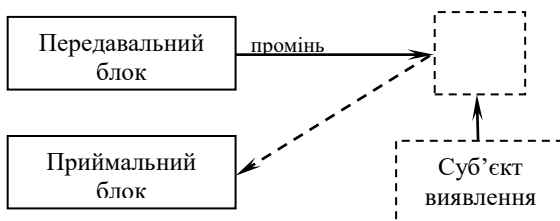


Рисунок 4.3 – Активні засоби виявлення з відбиванням

Площинні засоби виявлення призначені для охорони ділянок поверхні та володіють зоною виявлення довжиною та шириною від одного до декількох десятків метрів за відносної товщини поверхні від кількох сантиметрів до кількох десятків сантиметрів. На даний час площинні ЗВ майже не використовуються, оскільки повністю витіснені менш трудомісткими у монтажі об'ємними ЗВ.

Об'ємні ЗВ володіють тривимірною зоною виявлення з лінійними розмірами від кількох метрів до кількох десятків метрів. Їх використовують переважно для охорони окремих приміщень та замкнених об'ємів.

За конструктивними ознаками засоби виявлення бувають загороджувальними (ЧЕ виконано у вигляді фізичної перешкоди) та незагороджувальними. Загороджувальні ЗВ дозволяють не лише виявляти, але й на деякий час затримувати порушника. Незагороджувальні ЗВ значно дешевші та менш помітні.

За можливістю потайного монтажу засоби виявлення поділяють на візуально масковані (маскувальні) і немасковані. Масковані ЗВ залишаються непомітними для порушника після завершення процесу їх монтажу. Їх перевага полягає у тому, що непідготовлений порушник не може визначити положення зон виявлення для того, щоб спробувати обійти їх. У той же час, немасковані ЗВ прийнято застосовувати спеціально, мета – показати можливому порушнику, що об'єкт знаходиться під охороною (на корпусі давача розташовують світлодіод, який своїм світлом дублює сигнал тривоги). Вибір маскованих або немаскованих ЗВ системи охорони залежить від того, яким чином організовано система дій у відповідь сигналам спрацьовування.

За кількістю вихідних сигналів тривоги засоби виявлення поділяють на виявляючі (за наявності єдиного вихідного сигналу тривоги) та розпізнавальні (у яких кількість вихідних сигналів відповідає кількості об'єктів, які розпізнаються). Зазвичай завдання виявлення та завдання розпізнавання вирішуються послідовно.

За видом вихідного сигналу засоби виявлення поділяють на релейні та аналогові. Релейні ЗВ видають сигнал тривоги, який володіє двома станами: наявність тривоги та її відсутність – найчастіше шляхом розмикання нормальнозамкнених контактів реле, рідше – замиканням нормальнорозімкнених контактів. Аналогові ЗВ видають безперервний аналоговий сигнал, який буде набувати будь-якого значення певного діапазону.

За характером вихідного релейного сигналу засоби виявлення прийнято поділяти на давачі руху (переміщення) та давачі присутності (наявності). Перші формують сигнал спрацьовування у відповідь на рух об'єкта виявлення та не реагують на нерухомі об'єкти. Другі активують сигнал спрацьовування протягом усього часу знаходження СВ у межах зони виявлення.

За типом зв'язку між засобами виявлення та засобами оповіщення їх поділяють на дротові та бездротові (за зв'язком по радіоканалу). Окрім того, дротові ЗВ можуть бути як багатопровідникові (передача сигналу тривоги та кожного додаткового сигналу за окремою витю парою провідників), так і з кодуванням інформації (передача різних сигналів у кодованому вигляді по одній парі провідників). Бездротові ЗВ здійснюють зв'язок на радіочастотах та використовуються у двох випадках:

- за необхідності передачі інформації на великі відстані (висока вартість прокладання кабелю);
- за неможливості встановлення дротового типу зв'язку.

Переважну більшість наявних засобів виявлення відносять до незагороджувальних, немаскованих, виявляючих, релейних, багатопровідникові.

Найбільш повну уяву про різноманіття засобів виявлення формує їх класифікація за фізичним принципом виявлення. Для того, щоб об'єкт було виявлено, необхідно, щоб будь-який фізичний вплив (дія) від нього надійшов на чутливий елемент. Участь у передачі впливу (дії), окрім суб'єкта виявлення та чутливого елемента, беруть участь як середовище (усі матеріальні об'єкти, які знаходяться між ними), так і матеріальний носій інформації (МНІ), який безпосередньо впливає на ЧЕ (рис. 4.4).

При цьому можливими будуть наступні варіанти передачі впливу (рис. 4.5):

- за рахунок безпосереднього механічного контакту об'єкта виявлення та чутливого елемента без участі середовища;

– у разі передачі впливу (дії) через середовище матеріальним носієм інформації може служити саме середовище або окремі її елементи; при цьому вплив може передаватися зміною тиску або коливаннями середовища (твердого, рідкого або газоподібного), теплопередачею або електричним струмом в середовищі (твердого або рідкого);

– у разі передачі впливу (дії) через проникне середовище (повітря або воду, якщо виявлення йде під водою) крізь нього можуть переміщатися матеріальні об'єкти (частки речовини, гази або радіоактивні частинки) або у ньому можуть поширюватися поля (електричне, магнітне чи гравітаційне) або електромагнітні хвилі різних частотних діапазонів.

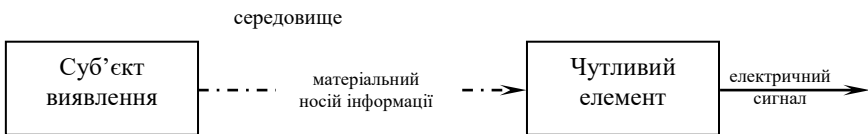


Рисунок 4.4 – Передача впливу (дії) від об'єкта виявлення до чутливого елемента

У нижньому ряду рисунка 4.5 подано усі можливі шляхи передачі впливу (дії) від об'єкта виявлення до чутливого елемента, які можуть бути застосовані з метою подальшого його виявлення.

Тиск середовища, без сумніву, є лише низькочастотною складовою коливального процесу, проте його варто розглядати окремо від останнього, оскільки це часто вимагає, для свого сприйняття, спеціальних ЧЕ та іншого оброблення сигналів.

Таким чином, на практиці виділяють 21 вид МНІ, які є придатними для вирішення задач виявлення. Кожному виду МНІ відповідають відповідні типи засобів виявлення (нараховується 28 основних типів ЗВ).

4.3 Класифікація засобів виявлення за дією фізичного впливу

Класифікація засобів виявлення за фізичним принципом дії наведена у таблиці 4.1

4.4 Характеристика засобів виявлення

4.4.1 Електромеханічні засоби виявлення

Даний тип пристроїв сприймає безпосередній механічний вплив від об'єкта виявлення, у вигляді переміщення робочого органу давача, і перетворює його на

сигнал розмикання або замикання контактів зовнішнього електричного ланцюга. Електромеханічні ЗВ прийнято поділяти на три види:

- електроконтактні засоби виявлення, які у якості чутливого елемента містять електричну кнопку або перемикач;
- магнітоконтактні засоби виявлення, чутливим елементом якого є герметичний контакт – геркон, який спрацьовує при наблизенні або віддаленні від нього магніту (такі ЗВ володіють більшою надійністю у порівнянні з першими);
- електрообривні засоби виявлення, які формують сигнал тривоги під час обриву електричного ланцюга у момент руйнування чутливого елемента.

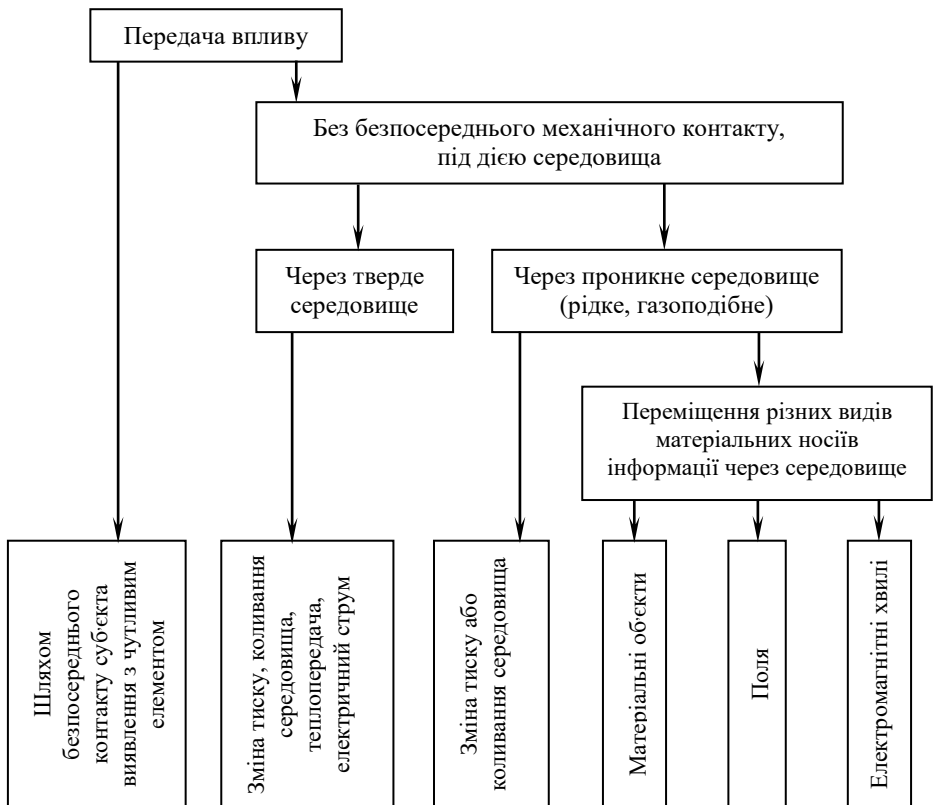


Рисунок 4.5 – Можливі варіанти передачі впливу

Загальною перевагою електромеханічних засобів виявлення є їх гранична простота. Для них не потрібно ні блоків оброблення сигналів, ні джерел

живлення. Вони легко монтуються, а після встановлення непомітні. Загальним недоліком цієї групи є їх низька апаратурна надійність, а електрообривні – фактично одноразові.

На практиці, перевагу надають магнітоконтактним засобам виявлення.

Таблиця 4.1 – Класифікація засобів виявлення за фізичним принципом впливу (дії)

Середовище	Матеріальний носій інформації	Тип засобу виявлення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Без безпосереднього середовища	Безпосередній механічний контактний вплив	Електро-механічний: – електроконтактний; – магнітоконтактний; – електрообривний
		Тензометричний
Тверде середовище (земля, ґрунт, підлога, паркан, огорожа)	Тиск	Лінійний давач тиску Нахилометричний
	Коливання	Вібраційний – віброконтактний; – п'єзоелектричний; – аналоговий; – трибоелектричний; – електретний; – оптоволоконний
		Сейсмічний
		Теплопередача
	Електричний струм	Кроковий
Повітря	Тиск	Барометричний
	Акустичні коливання	Акустичний пасивний – мікрофонний; – давач розбиття скла
		Акустичний активний – променевий; – доплерівський; – об'ємний
Повітря (проникне середовище)	Макроскопічні часточки	—
	Гази	Ольфактронний
	Радіаційні часточки	Радіаційний

Завершення таблиці 1

1	2	3
Повітря (середовище розповсюдження полів)	Електричне поле	Електростатичний
	Магнітне поле	Магнітометричний – точковий; – петлевий
	Гравітаційне поле	Гравіметричний
Повітря (непровідне середовище, прозоре для електромагнітних хвиль)	Низькочастотні хвилі (довж. хвилі 10^{11} - 10^4 м)	—
		—
	Радіохвилі (довж. хвилі 10^4 - 10^1 м)	Ємнісний
		Індуктивний
		Провідно-хвильовий
		Лінія витікання хвилі
	Ультрарадіохвилі (довж. хвилі 10^{-1} - 10^{-3} м)	Антенний
		Радіопроменевий
		Радіолокаційний
	Інфрачервоні промені (довж. хвилі 10^{-3} - $0,78 \times 10^{-6}$ м)	Радіометричний
		Інфрачервоний пасивний – однопроменевий; – багатопроменевий; – тепловізійний
Фотопроменевий		
Світлові промені (довж. хвилі $0,78 \times 10^{-6}$ - $0,38 \times 10^{-6}$ м)	Інфрачервоний активний із відбиттям	
	(Фотопроменевий)	
Ультрафіолетові промені (довж. хвилі $0,38 \times 10^{-6}$ - 10^{-9} м)	Телевізійний	
Рентгенівські промені (довж. хвилі 10^{-9} - 10^{-11} м)	(Фотопроменевий)	
Гамма-промені (довж. хвилі 10^{-12} - 10^{-14} м)	—	
	(Радіаційний)	
Різні	Різна	Інший
Будь-яка	Поєднання двох або більше МНІ	Комбінований

4.4.2 Тензометричні засоби виявлення. Чутливий елемент таких засобів виявлення дозволяє вимірювати силу впливу/дії об'єкта виявлення та

порівнювати її з граничним значенням, яке наперед задається. У якості ЧЕ тензометричного засобу виявлення використовують тензорезистор, натягнутий провідник, контактний килимок.

Область застосування тензометричних ЗВ обмежено їх встановленням усередині приміщень (в крайніх випадках ззовні, їх роботі заважають сніг та лід).

4.4.3 Лінійний давач тиску. Цей тип давачів сприймає деформацію всередині ґрунту, яка створюється зміною тиску на її поверхні під час переміщення об'єкта виявлення. Зазвичай ЧЕ такого засобу виконують у вигляді довгого еластичного шлангу, який заповнюють рідиною, що не замерзає, та закопують на невелику глибину в ґрунт.

На практиці, лінійні давачі тиску отримали й інші назви. Зокрема їх називають: барометричними давачами; шланговими ЗВ; інфранизькочастотними сейсмічними ЗВ та гідравлічними ЗВ.

4.4.4 Нахилометричні засоби виявлення. Нахилометричні ЗВ призначені для вимірювання зміну кута нахилу поверхні землі. Під дією сили тяжіння об'єкта виявлення поверхня прогинається, і кут нахилу змінюється. За умови перевищення вимірювального значення порогового рівня ініціюється сигнал спрацьовування. Зважаючи на низьку чутливість, нахилометричні ЗВ застосовують для виявлення об'єктів, яким притаманна велика маса.

4.4.5 Вібраційні засоби виявлення. Дія таких засобів виявлення заснована на реєстрації коливань, які виникають в результаті контакту із об'єктом виявлення в навколишніх твердих предметах (паркан; ґрати; стіна; предмет, який охороняється – сейф, вітрина тощо). За використанням чутливого елемента вібраційні ЗВ поділяють на шість видів:

- віброконтактні ЗВ – під дією вібрації чутливий елемент замикає або розмикає (механічно) зовнішній електричний ланцюг (у якості ЧЕ застосовують – геркони; незакріплену кульку на провідній опорі або ж ртутний контакт);
- вібраційні аналогові ЗВ – чутливий елемент формує на виході аналоговий електричний сигнал, який буде пропорційним зміщенню (електродинамічний давач або контактним мікрофон) або прискоренню коливань (акселерометр);
- оптоволоконні ЗВ – чутливим елементом виступає звичайне оптоволокно, яке під час деформації змінює величину оптичного сигналу;
- п'єзоелектричні ЗВ – чутливим елементом виступає сам п'єзоелектричний елемент;
- трибоелектричні ЗВ – чутливим елементом виступає багатожильний кабель (деяких типів), у якому під час механічної деформації в провідниках формується заряд, який буде пропорційним деформації;

– електретні ЗВ – чутливим елементом виступає електретний кабель, тобто коаксіальний кабель із радіально поляризованим діелектриком (електретом), який формує заряд під час механічної деформації (електретний кабель володіє більшою чутливістю у порівнянні з трибоелектричним).

4.4.6 Сейсмічні засоби виявлення. Принцип дії цих засобів засновано на реєстрації коливань ґрунту, які виникають під час пересування об'єкта виявлення. У якості чутливого елемента, зазвичай, використовують сейсмометричний давач – геофон – точковий магнітоелектричний давач коливань підвищеної чутливості, який прийнято закопувати на невелику глибину у землю.

Часто точкові сейсмодавачі з'єднують послідовно в одну групу. Такі групи є самостійним чутливим елементом, який прийнято називати сейсмолінією, сейсмкою або просто косою. Точковий сейсмодавач дозволяє блокувати окрему ділянку (доріжку, стежку), а сейсмолінія – лінійну межу великої довжини.

Основною перевагою сейсмічних ЗВ є їх повна маскованість. Щодо недоліків то тут варто виділити низьку завадостійкість під час сильного вітру за наявності дерев або іншої рослинності, а також від транспорту.

4.4.7 Термічні засоби виявлення. Термічні ЗВ сприймають вплив високої температури та призначені для виявлення спроб застосування об'єктом виявлення інструмент термічного різання (газовий пальник) для проходу або розкриття об'єкту захисту. Такі засоби прийнято встановлювати на сталеві ґрати, перегородки, двері, сейфи, вогнетривкі шафи.

Даний тип засобів виявлення характеризується дешевизною та високою стійкістю до перешкод.

4.4.8 Крокові засоби виявлення. Даний тип засобів виявлення призначений для контролю опору ґрунту, який під час пересування людини періодично шунтується його кроковим опором. Поява сигналу із кроковою частотою ініціює сигнал спрацьовування.

4.4.9 Барометричні засоби виявлення. Барометричний ЗВ називають також інфразвуковими давачами. Цей тип давачів призначений для охорони закритих об'ємів та працює за рахунок реєстрації зміни тиску повітря (під час відкриття дверей або вікон у приміщенні).

4.4.10 Акустичні пасивні засоби виявлення. Принцип роботи акустичного пасивного ЗВ засновано на прийомі звукових коливань певного діапазону частот та порівнянні їх інтенсивності із заданим граничним значенням.

Акустичні пасивні ЗВ бувають двох видів (мікрофонні та давачі розбивання скла) й відрізняються між собою прийнятною смугою частот. Середньочастотні

засоби виявлення (мікрофонні або звукові) спрацьовують від шумів, які виникають під час появи та пересування об'єкта виявлення (кроки, голос). Високочастотні ЗВ (давачі розбивання скла) – від звуків розбивання скла.

4.4.11 Акустичні активні засоби виявлення. Акустичні активні ЗВ працюють переважно в області ультразвукових коливань (15-40 кГц) і тому отримали назву ультразвукові давачі. Вони складаються із випромінювача та приймача ультразвуку. Акустичні активні ЗВ поділяють на три види:

- променеві ЗВ – працюють за принципом фіксування переривання вузькоспрямованого ультразвукового променя об'єктом виявлення;
- доплерівські ЗВ – працюють за принципом формування доплерівського зсуву частот під час руху створеного об'єктом виявлення;
- об'ємні ЗВ – працюють за принципом реєстрування зміни картини стоячих хвиль, які формуються випромінювачем ультразвуку в замкненому об'ємі.

Усі акустичні засоби виявлення працюють тільки в приміщеннях, оскільки на вулиці володіють низькою стійкістю до перешкод.

4.4.12 Ольфактронні засоби виявлення. Даний тип засобів виявлення називають газоаналізаторами, а принцип їх роботи побудовано на принципі сприйняття запахів або газів, які виділяються людиною. Широкому поширенню ольфактронних ЗВ заважає їх велика вартість.

4.4.13 Радіаційні засоби виявлення. Радіаційні (радіоізотопні) ЗВ засновано на принципі реєстрування інтенсивність потоку радіоактивних частинок (альфа-, бета-, гамма-часток, протонів, нейтронів), які випромінюються передавальним блоком. Джерелом випромінювання є радіоактивний ізотоп.

Радіаційні засоби виявлення працюють за принципом променевих ЗВ та фіксують появу об'єкта виявлення відносно послаблення потоку радіаційних часточок. Ці засоби виявлення не вимагають додаткового прокладання кабелю до передавального блоку та відрізняються високою стійкістю відносно перешкод. Враховуючи вимоги щодо безпеки здоров'я людей радіаційні ЗВ мають обмежене використання.

4.4.14 Електростатичні засоби виявлення. Електростатичні ЗВ здатні виявити появу, у своїй зоні виявлення, усі об'єкти, які володіють зарядом.

У зв'язку із сильним зменшенням електростатичного поля заряду при збільшенні відстані від нього, даний тип ЗВ використовують переважно у вузьких проходах (коридор, дверні та вікна).

4.4.15 Магнітометричні засоби виявлення. Магнітометричні ЗВ працюють на контролі спотворення природного магнітного поля Землі і тому працюють за принципом фіксування переміщення об'єкта виявлення, який володіє магнітним

моментом.

Значна частина магнітометричних ЗВ побудована на явищі магнітної індукції (індукційні магнітометричні ЗВ), яке полягає у появі наведеної ЕРС в багатовитковій котушці при зміні індукції магнітного поля.

За видом чутливого елементу магнітометричні ЗВ поділяють на два види:

– точковий або зосереджений – складається із компактного ЧЕ у вигляді котушки з декількома тисячами витків провідника на феромагнітному сердечнику;

– петлевий – ЧЕ виконують у вигляді петлі багатожильного кабелю, який розпаюють у вигляді багатовиткової котушки та закопують на невелику глибину в ґрунт.

В основу роботи точкових ЗВ покладено принципи, які базуються на роботі ферозондів, тонких магнітних плівок та СКВІД-магнетометрів (вимірювання дуже малих магнітних полів). Даний вид засобів виявленні використовують у вузьких коридорах, проходах або поблизу доріг – для виявлення автомобілів. Щодо петльових ЗВ, то їх використовують переважно для охорони лінійних меж периметра.

4.4.16 Гравіметричні засоби виявлення. Принцип дії гравіметричного (гравітаційного) ЗВ ґрунтується на реєстрації зміни гравітаційного поля об'єкта виявлення. Гравітаційне поле присутнє для усіх матеріальних об'єктів, які володіють власною масою. Гравітаційне поле не екранується, тому для об'єкта виявлення не можливо приховати або замаскувати свою присутність. Гравіметричних ЗВ поки не існує.

4.4.17 Ємнісні засоби виявлення. Ємнісні ЗВ побудовано на принципі вимірювання ємності антенної системи (металевий паркан, козирок на стіні будівлі, сталевий сейф тощо). Під час наближення об'єкту виявлення до чутливого елемента ЗВ ємність антени змінюється, що й призводить до спрацьовування засобу. Тіло людини безпосередньо впливає на діелектричну проникність, тому ємність буде змінюватись та чітко фіксуватись.

Ємнісні засоби виявлення широко розповсюджені, а стійкість їх роботи напряму залежить від наявності якісного заземлення.

4.4.18 Індуктивні засоби виявлення. В індуктивних ЗВ, як і ємнісних, наявною є антенна система, яка фіксує зміну її індуктивності з появою об'єкта виявлення. Зміна індуктивності зазвичай є невеликою, а тому цим засобам притаманна невисока стійкість до перешкод та невелике розповсюдження у порівнянні з ємнісними.

4.4.19 Провідно-хвильові засоби виявлення. Цей тип засобів виявлення містить передавач, так і приймач для електромагнітного випромінювання.

Приймачі та передавачі виконують у вигляді провідних антен, які розташовують на невеликій відстані один від одного. Провідно-хвильові ЗВ працює на частотах у діапазоні 100 МГц. У разі наближення об'єкту виявлення до такого засобу виявлення змінюється амплітуда та фаза сигналу, який приймається (зміни відстежуються електронним блоком оброблення ЗВ).

Провідно-хвильові засоби виявлення, як і точкові ЗВ, застосовують для охорони окремих предметів або як лінійні.

4.4.20 Лінія витікаючої хвилі. Такий тип засобу виявлення складається із одного випромінюючого кабелю й одного або декількох приймальних кабелів, які розташовують на невеликій відстані паралельно випромінюючому кабелю. Довжина кабелів не повинна перевищувати 100 м.

Коаксіальний кабель, у якому технологічно виконано рівномірні прорізи суцільного екрану, за усією його довжиною, є основою для випромінюючого та приймальних кабелів. Наявність прорізів забезпечує рівномірне випромінювання та приймання електромагнітних хвиль уздовж усієї довжини кабелю. Поява об'єкта виявлення поблизу кабелів призводить до зміни рівня сигналу.

Лінія витікаючої хвиля дозволяє охороняти непрямолінійні ділянки периметра, а самі кабелі прийнято закріплювати на огорожі, стіні або закопувати на невелику глибину в ґрунт.

4.4.21 Антенні засоби виявлення. Антенні засоби виявлення прийнято відносити до пасивних ЗВ, які працюють у діапазоні ультракоротких хвиль з частотою близько 100 МГц. Вибір діапазону напряму пов'язаний із наявністю «природного» фону, який створюється великою кількістю радіомовних станцій.

Під час наближення об'єкта виявлення до антени рівень сигналу, який приймається, періодично збільшується або зменшується.

Недоліком антенних ЗВ є нестійкість їх роботи та нестабільність параметрів, які залежать від місця встановлення. Розширення перспектив антенних ЗВ відбувається у момент переходу їх діапазони стільникового зв'язку.

4.4.22 Радіопроменеві засоби виявлення. Для радіопроменевих ЗВ притаманним є наявність, у своєму складі, передавача та приймача електромагнітного випромінювання, які працюють на одній із фіксованих частот в діапазоні від 1 до 60 ГГц.

Передавач та приймач направляють один на одного. У черговому режимі приймач реєструє випромінювання передавача. При появі в зоні променя, між передавачем і приймачем (довжина ділянки може досягати сотень метрів), об'єкта виявлення випромінювання, яке буде прийматись, послаблюється за рахунок часткового його перекриття, що і фіксують засобом виявлення.

Радіопроменеві ЗВ є одним із найбільш поширених засобів виявлення, який

застосовують для охорони периметрів. Цей тип, у порівнянні з іншими, відрізняється високою стійкістю до природних погодних умов (дощ, сніг, туман).

4.4.23 Радіолокаційні засоби виявлення. Принцип дії радіолокаційного ЗВ засновано на ефекті Доплера. Цей тип засобів виявлення зазвичай є однопозиційним та містить в одному корпусі випромінювач електромагнітних коливань частотою близько 10 ГГц, приймач і блок оброблення, який здатний виділити доплерівську частоту й здійснити, у найпростішому випадку, селекцію (вибір) об'єктів виявлення за швидкістю пересування. Для складніших варіантів радіолокаційних ЗВ притаманною є селекція за дальністю по відношенню до об'єкту виявлення.

Радіолокаційні ЗВ прийнято використовувати і для охорони приміщень, і для охорони периметрів.

4.4.24 Радіометричні засоби виявлення. Радіометричні ЗВ відносять до об'ємних засобів виявлення. Конструктивно вони складаються з передавача електромагнітного випромінювання, який замкнутому об'ємі створює поле стоячих хвиль, та приймача електромагнітного випромінювання, який здатний фіксувати зміни цього поля у разі наявності об'єкта виявлення у ньому.

Радіометричні ЗВ, які призначені для приміщень, є одними із найбільш завадостійких типів засобів виявлення.

Провідно-хвильові, лінії витікання хвилі, радіопроменеві, радіолокаційні та радіометричні засоби виявлення часто називають радіотехнічними або радіохвильовими. У свою чергу, радіопроменеві, радіолокаційні та радіометричні засоби виявлення отримали назву мікрохвильових або надвисокочастотних давачів.

4.4.25 Інфрачервоні засоби виявлення. Інфрачервоні (ІЧ) пасивні засоби виявлення побудовані на принципі сприйняття природного теплового випромінювання людини.

Даний тип ЗВ працює у діапазоні довжин хвиль електромагнітного випромінювання (до 10 мкм), а висока чутливість давачів дозволяє фіксувати перепади температур до 0,1 К.

ІЧ пасивні засоби виявлення поділяють на три види:

- одіопроменеві – зона виявлення формується у вигляді вузького променя, який генерується оптичною системою (лінза або дзеркало);
- багатопроменеві – зона виявлення формується за допомогою спеціальних лінз Френеля; сигнал тривоги виникає під час послідовного перетину об'єктом виявлення декількох променів, завдяки чому досягається висока їх завадостійкість;

– тепловізійні – складаються із матриці елементів, які є чутливими до ІЧ-випромінювання, що дозволяє отримувати зображення, аналогічне телевізійному.

Багатопроменеві пасивні інфрачервоні засоби виявлення є найбільш розповсюдженими та широко застосовуються для охорони приміщень.

4.4.26 Фотопроменеві засоби виявлення. Фотопроменеві (оптичні або інфрачервоні активне) ЗВ складається із випромінювача та приймача, які спрямовані один на одного. Під час переривання променя формується сигнал тривоги.

Фотопроменеві ЗВ працюють зазвичай у діапазоні ІЧ-випромінювання, в окремих випадках у діапазонах видимого світла або ультрафіолетового випромінювання (ультрафіолетові активні ЗВ).

Часто фотопроменеві ЗВ випромінюють на один, а декілька променів, що дозволяє виключити можливість проповзування під променем або перестрибування через нього, підвищити завадостійкість засобу та оцінювати розміри та швидкість руху об'єкта виявлення.

Фотопроменеві ЗВ відрізняються дешевиною, але під час використання їх на вулиці вимагають запасу потужності випромінювача за складних погодних умов (сильний дощ, туман, снігопад). Дані засоби виявлення потребують періодичного юстування передавального та приймального блоків та чищення оптичних елементів.

4.4.27 Інфрачервоні активні засоби виявлення. Інфрачервоні активні ЗВ з відбиттям складаються із передавача та приймача, які спрямовано на певну точку у просторі (у черговому режимі випромінювання передавача розсіюється у просторі та не доходить до приймача). З появою об'єкта виявлення у заданій точці, відбите від нього випромінювання надходить на приймач, що призводить до формування сигналу тривоги.

Засоби виявлення даного типу зазвичай реалізують у якості однопозиційних.

4.4.28 Телевізійні засоби виявлення. Під телевізійним ЗВ розуміють пристрій, який аналізує зображення з відеокамери та формує сигнал тривоги (найчастіше такий сигнал використовують для привернення уваги оператора).

На практиці, телевізійні ЗВ можуть бути як пасивним, які працюють за природнього освітлення, так і активні – штучне підсвічування зони виявлення.

Телевізійні засоби відеоспостереження застосовують, як правило для охорони приміщень та вуличних об'єктів.

4.4.29 Інші засоби виявлення. До інших ЗВ відносять рідкісні, які не знайшли використання через високу вартість, працюють за обмежених умов

застосування та інші засоби виявлення, які не сформувалися в окремі типи.

4.4.30 Комбіновані засоби виявлення. Комбіновані ЗВ – це засоби виявлення, які поєднують у собі декілька різних фізичних принципів виявлення. Усі чутливі елементи, які входять до складу комбінованих ЗВ, повинні поєднувати (суміщати) зони виявлення і за можливістю різні види перешкод, які здатні викликати сигнали помилкової тривоги.

Найбільш поширеними комбінаціями є сейсмомагнітометричні ЗВ та поєднання ГЧ-пасивного та радіолокаційного доплерівського засобу виявлення. У разі поєднання двох фізичних принципів, комбіновані давачі називають давачами подвійної технології.

Комбіновані ЗВ створюють з метою підвищення стійкості до перешкод, завдяки формуванню загального сигналу тривоги тільки за підтвердження сигналів спрацьовування по усіх каналах виявлення (практично не мають помилкових спрацьовувань).

Комбіновані ЗВ не можна вважати самостійним типом засобів виявлення за умови їх розподілу за фізичним принципом дії.

Найбільшого розповсюдження набули засоби виявлення таких типів:

- магнітоконтактні – для охорони дверей приміщень;
- тензометричні – для охорони окремих предметів, переважно творів мистецтва, усередині приміщень;
- акустичні пасивні – для захисту вікон приміщень від розбивання;
- ємнісні – для встановлення на паркані або огорожі;
- радіопроменеві – для охорони ділянок периметра;
- радіолокаційні доплерівські та ГЧ-пасивні – для встановлення всередині приміщень;
- телевізійні – як засоби відеоспостереження.

Наведена класифікація засобів виявлення дозволяє не тільки систематизувати ЗВ, знаходити нові типи, але й створювати фізичні моделі виявлення, а на їх основі – проводити оцінювання значень корисних сигналів (від ОВ) і сигналів, які формуються перешкодами (від чинників перешкод).

Рекомендована література: [1; 6; 10; 11; 12; 15].

Запитання для самоконтролю

1. Для виявлення яких об'єктів застосовують нахилометричні ЗВ?
2. З якою метою створюють комбіновані засоби виявлення?
3. За якої умови формується сигнал тривоги в комбінованих ЗВ?
4. Матеріальні носії інформації, які використовуються у навколишньому середовищі.

5. На яких діапазонах частот працюють антени ЗВ?
6. На якому фізичному принципі побудовано інфрачервоні пасивні засоби виявлення?
7. Назвіть варіанти передачі впливу (дії) від об'єкта виявлення до чутливого елемента.
8. Назвіть додаткові функції, які сучасні ЗВ можуть оцінювати та видавати.
9. Назвіть основні види електромеханічних засобів виявлення.
10. Опишіть типи помилок, які виникають під час роботи засобу виявлення. Як їх прийнято називати?
11. Охарактеризуйте давачі руху та давачі присутності за характером їх вихідного релейного сигналу.
12. Охарактеризуйте форму зон виявлення.
13. Оцініть радіопроменевий ЗВ з точки зору зони контролю.
14. Перерахуйте засоби виявлення, дія яких базується на коливаннях у твердому середовищі та які фізичні ефекти тут використовуються.
15. Поясніть відмінність між акустичними активними та пасивними ЗВ.
16. Поясніть принцип дії лінійного давача тиску.
17. Поясніть різницю між засобом виявлення та давачем.
18. Поясніть різницю між однопозиційними, двохпозиційними та бістатичними засобами виявлення.
19. У чому полягає відмінність між трибоелектричними та електретними вібраційними зв?
20. У чому полягає принципова відмінність між активними та пасивними засобами виявлення?
21. Чому саме межа між зоною, яка охороняється, та зоною вільного переміщення становить особливу складність під час проектування систем виявлення?
22. Що являє собою «черговий стан» ЗВ?
23. Що являє собою засіб виявлення та з яких функціональних частин він складається?
24. Що являють собою змішані схеми виявлення? До якого типу ЗВ їх відносять?
25. Як класифікують пасивні інфрачервоні ЗВ?
26. Яка конструктивна особливість випромінюючого/приймального кабелю відрізняє лінію витікаючої хвилі від стандартного коаксіального кабелю?
27. Яка основна перевага сейсмічних ЗВ?
28. Який фізичний ефект лежить в основі роботи радіолокаційного ЗВ?

29. Які додаткові засоби та підсистеми є необхідними для повного розв'язання задачі охорони об'єкта?
30. Які ЗВ можуть бути виявленими передавачами?
31. Які зовнішні чинники обмежують застосування тензOMETричних ЗВ поза приміщеннями?
32. Які недоліки притаманні для фотопромених ЗВ, які експлуатуються на вулиці?
33. Які типи ЗВ базуються на використанні ультра- та радіохвиль?
34. Які типи ЗВ не потребують безпосереднього середовища? Поясніть принцип їх дії.

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. Фізичні явища: властивості та опис

ТЕМА 5. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ОХОРОНИ ТА БЕЗПЕКИ: МЕХАНІКА

План:

- 5.1 Інерційні закони відліку.
- 5.2 Швидкість та закон додавання швидкостей.
- 5.3 Перетворення Галілея.
- 5.4 Сили в живій природі.
- 5.5 Кінематика твердого тіла.
- 5.6 Неінерційні системи відліку.
- 5.7 Динаміка систем.
- 5.8 Робота та енергія.
- 5.9 Гідростатика.
- 5.10 Гідродинаміка.

Як бачимо, сфера діяльності, яка пов'язана із охороною та безпекою тісно пов'язана не лише з інформаційними технологіями але й з глибоким розумінням фізичних принципів, які покладено в основу функціонування апаратних засобів. Серед основних таких принципів механіка посідає одне із ключових місць, оскільки саме вона описує рух, сили, енергію та взаємодію фізичних тіл, а це є критично важливим для надійності, стійкості та ефективності систем, які вони формують.

Підібраний матеріал сфокусовано на механічних основах апаратних засобів безпеки. Наведено основні закони класичної механіки, від статички та кінематики до динаміки, які покладено в їх роботу та застосовуються під час проектування та експлуатації.

5.1 Інерційні закони відліку

5.1.1 Перший закон Ньютона

Для опису руху тіл можна використовувати будь-які системами відліку. При цьому в довільній системі відліку характер руху тіла (зміна швидкості в часі, форма траєкторії тощо) визначається не лише дією інших тіл, а й властивостями системи відліку. Тож рух даного тіла в різних системах відліку може бути складнішим чи простішим (видимий рух планет на небосхилі, тобто – відносно Землі, відбувається за складними траєкторіями, в той час як відносно Сонця вони рухаються за простими траєкторіями). Але в деяких системах відліку характер руху тіла при заданих початкових умовах визначається тільки його взаємодією з іншими тілами. Такі системи називають інерційними системами відліку.

Особливості цього класу систем відліку відображує перший закон Ньютона, за яким в інерційній системі відліку тіло за відсутності взаємодії з іншими тілами зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху. Таке тіло називається вільним, і його рух теж називається вільним рухом, або рухом за інерцією. Тому перший закон Ньютона також називають законом інерції.

Як бачимо, в інерційній системі відліку рух вільного тіла є найпростішим. При цьому виявляється, що в таких системах відліку й інші закони фізики набувають найбільш простого вигляду. Тому для фізики інерційні системи відліку є переважними. Але тут виникає принципова складність. Інерційність системи відліку можна встановити тільки за характером руху в ній вільного тіла, але абсолютно вільних тіл у природі, строго говорячи, не існує. Тому реально ми можемо мати справу тільки з тілами, дія на котрі з боку інших тіл є або компенсованою, або неістотною. Отже, теоретично довести інерційність тієї, чи іншої системи відліку принципово неможливо. Це є питанням дослідження, і саме дослідження свідчить, що такі системи відліку існують (дехто трактує перший закон як твердження про існування інерційних систем відліку).

Численні спостереження показують, що з гранично великою точністю інерційними можна вважати системи відліку, пов'язані із віддаленими «нерухомими» зірками та з Сонцем, а також такі, що рухаються відносно зірок поступально, рівномірно та прямолінійно, тобто без будь-яких прискорень. Що ж до систем відліку, пов'язаних із Землею, які найчастіше використовують на практиці, то їх можна вважати інерційними лише наближено через наявність у них невеликих прискорень зумовлених обертанням Землі навколо власної осі та орбітальним рухом навколо Сонця.

5.1.2 Другий закон Ньютона

Сила. В інерційній системі відліку зміна стану руху тіла зумовлюється

виключно дією на нього з боку іншого тіла чи тіл. Кількісною мірою такої дії є сила – одна з основних величин динаміки. Сила володіє наступними загальними властивостями:

- зовнішньою ознакою сили є зміна швидкості тіла (ще одною ознакою сили є деформація тіл, але при вивченні законів руху вона є несуттєвою);
- дія одного тіла на інше завжди має певний напрям, тому сила є векторною величиною;
- якщо матеріальна точка взаємодіє не з одним, а з декількома іншими тілами, то, як показує дослід, діюча на неї сила визначається як:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \sum_i \vec{F}_i, \quad (5.1)$$

де \vec{F}_i – сила, яка би діяла на точку з боку i -того тіла за відсутності інших (рис. 5.1).

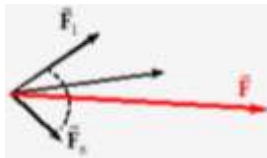


Рисунок 5.1 – Складова сили

У цьому сенсі говорять, що сили \vec{F}_i підпорядковані принципу суперпозиції. Силу \vec{F} називають рівнодієюною силою, а \vec{F}_i – складовими силами.

Поняття рівнодієюною є зручним, оскільки дозволяє лаконічно записувати й формулювати відповідні закони та співвідношення механіки. З іншого боку, задану силу можна розкласти на будь-які складові так, аби виконувалося співвідношення (5.1). Але слід зауважити, що для тіл, які не можна вважати матеріальними точками, поняття рівнодієюною існує тільки тоді, коли лінії дії всіх прикладених до тіла окремих сил перетинаються в одній точці.

У механіці всі сили поділяють на два класи: сили, що виникають при безпосередньому контакті тіл (сила тертя, сила опору, сила тиску, тощо), та сили, що діють між тілами на відстані (наприклад, сила всесвітнього тяжіння, сила взаємодії між електричними зарядами та струмами). В останньому випадку кажуть, що в просторі існує силове поле (гравітаційне, електромагнітне), в якому на дане тіло діє певна сила (зазначений поділ є умовним, оскільки на

молекулярному рівні поняття дотику втрачає прямий зміст, бо взаємодія між молекулами здійснюється не «безпосередньо», а через створюване ними електромагнітне поле).

Сили різної фізичної природи мають різні властивості, але у загальному випадку сила взаємодії між двома тілами визначається їх взаємним розташуванням і швидкістю їх руху одне відносно одного: $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}, \vec{v})$.

Маса та імпульс. Дослідження підтверджують, що будь-яке тіло «чинить опір» при спробах зміни його швидкості, через що швидкість тіла неможливо змінити миттєво навіть на дуже малу величину. Ця властивість називається інертністю тіла. Мірою інертності тіла є його маса. Чим більша інертність, тим більша маса тіла, тож під дією однакової сили швидкість тіла з більшою масою змінюється повільніше, ніж у тіла з меншою масою.

Масу тіл визначають, у той чи інший спосіб порівнюючи її з масою еталона. Одиницею маси в міжнародній системі одиниць (СІ) є 1 кілограм.

Маса має дві важливі властивості:

- маса є скалярною й, у межах ньютонівської механіки, адитивною величиною, тобто маса тіла дорівнює сумі мас його складових частин;
- інертність є внутрішньою властивістю тіла, тому маса тіла не залежить від його руху, отже й від системи відліку, в якій розглядається рух.

Через наявність інертності механічний стан тіла визначається не лише швидкістю, а й масою. Тому в динаміці мірою стану руху тіла є імпульс – добуток маси тіла на вектор його швидкості:

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad (5.2)$$

отже імпульс є вектором напрямленим, як і швидкість, по дотичній до траєкторії руху тіла. Одиницею імпульсу є 1 кг·м/с.

Імпульс теж є адитивною величиною – імпульс системи дорівнює сумі імпульсів усіх тіл, які входять до її складу:

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i \vec{v}_i, \quad (5.3)$$

Другий закон Ньютона. Аналізуючи результати дослідів і спостережень за рухом тіл, Ньютон встановив, що швидкість зміни імпульсу тіла (тут і далі мається на увазі матеріальна точка) повністю визначається силою, що діє на нього, згідно з рівнянням:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad (5.4)$$

де $d\vec{p}$ – зміна імпульсу за нескінченно малий проміжок часу dt ;

\vec{F} – рівнодійна сила, прикладена до тіла (зауважимо, що математично ліва частина цього виразу являє собою похідну імпульсу по часу).

Це твердження становить другий закон Ньютона. Його також записують у вигляді:

$$d\vec{p} = \vec{F} \cdot dt, \quad (5.5)$$

Величину $\vec{F} \cdot dt$ називають імпульсом сили за час dt . Отже другий закон Ньютона можна сформулювати й так: приріст імпульсу тіла за певний проміжок часу дорівнює імпульсу сили , що діє на тіло протягом цього часу.

За необхідності визначати зміну імпульсу за скінчений проміжок часу t_1 - t_2 вираз (5.5) треба інтегрувати на проміжку від t_1 до t_2 :

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot dt. \quad (5.6)$$

Якщо маса тіла не змінюється ($m=\text{const}$), то $d\vec{p} = d(m\vec{v}) = m d\vec{v}$ і тоді $\frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$, де $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ – прискорення. Отже, для тіла незмінної маси другий закон Ньютона можна записати у вигляді:

$$m\vec{a} = \vec{F}, \quad (5.7)$$

тобто, добуток маси тіла на його прискорення дорівнює рівнодійній силі, що прикладена до тіла.

На основі цього рівняння встановлена одиниця сили – ньютон (Н): 1 Н – це сила, котра тілу маси 1 кг надає прискорення 1 м/с².

5.1.3 Третій закон Ньютона

Дія одного тіла на інше завжди має взаємний характер, тобто сили є проявом взаємодії між тілами. Третій закон Ньютона виражає загальну властивість сил взаємодії між тілами: сили, з якими два тіла діють одне на одне, завжди рівні по модулю і напрямлені у протилежні боки вздовж прямої, що з'єднує тіла (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Дія сил у третьому законі Ньютона

Отже,

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, \quad (5.8)$$

Щодо наведеного формулювання треба зауважити таке:

– сили взаємодії завжди мають одну й ту саму фізичну природу та походження;

– будь-яка сила, що діє на тіло, не залежить від інших прикладених до нього сил. Тому третій закон Ньютона виконується й у довільній системі (сукупності тіл) для кожної пари тіл.

5.1.4 Основне рівняння динаміки

Закони Ньютона є системою органічно взаємопов'язаних тверджень, і в будь-якій задачі динаміки «працюють» усі три закони. Але основним є другий закон Ньютона, оскільки він безпосередньо оперує характеристиками руху – імпульсом або прискоренням (рівняння (5.4), (5.7)).

Враховуючи, що прискорення $\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$, другий закон Ньютона (5.7) можна подати у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad (5.9)$$

яке є основним рівнянням динаміки матеріальної точки. Це рівняння також називають основним рівнянням руху матеріальної точки, оскільки воно дозволяє розв'язати основну задачу динаміки – визначити закон руху точки, тобто залежність її радіуса-вектора від часу $\vec{r} = \vec{r}(t)$. Для цього треба проінтегрувати рівняння (5.9) при відомій залежності сили від часу $\vec{F} = \vec{F}(t)$ і заданих початкових умовах – початкових швидкості $\vec{v}_0 = \vec{v}(0)$ і радіусі-векторі $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$. Розв'язування диференціального рівняння називається його інтегруванням, оскільки зводиться до однойменної математичної процедури. На загал для цього треба знати теорію диференціальних рівнянь, але в простих задачах достатньо й початкових відомостей з інтегрального числення.

Рівняння (5.9) дозволяє розв'язувати й обернені задачі (визначати силу, яка діє на точку, та її швидкість і прискорення, якщо відомий закон руху). Ці задачі є досить простими і зводяться до диференціювання по часу заданої функції $\vec{r}(t)$.

5.2 Швидкість та закон додавання швидкостей

Існує три способи опису положення та руху точки в обраній системі відліку

– векторний, координатний та природний (відповідно й набір кінематичних величин, які для цього використовуються). Розглянемо кожен із способів опису руху окремо, а також зв'язок між кінематичними характеристиками руху в різних системах відліку.

5.2.1 Векторний спосіб опису руху

Даний спосіб ґрунтується на понятті радіуса-вектора та є найзручнішим для теорії, оскільки дозволяє лаконічно й повно відображати зміст кінематичних величин і зв'язок між ними.

Радіус-вектор, траєкторія, шлях, переміщення. Положення точки у просторі можна задавати її радіусом-вектором \vec{r} . Радіус-вектор – це вектор, який проведено із початку відліку в якусь конкретну точку (рис. 5.3). Рухомою частинкою, отже й кінець її радіуса-вектора, описує в просторі неперервну лінію, яку називають траєкторією руху. Можна сказати, що траєкторія є геометричним місцем точок кінця радіуса-вектора частинки, яка рухається. Довжину відрізка траєкторії між двома точками називають шляхом, який було пройдено частинкою за відповідний проміжок часу. Шлях визначає відстань, яку пройшла частинка вздовж траєкторії, але шлях не містить жодної інформації про її кінцеве положення. Тому для визначення зміни положення точки в просторі використовують переміщення $\Delta\vec{r}$ – вектор, який проводять із початкового в кінцеве положення точки на траєкторії (рис. 5.10).

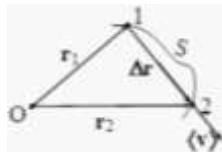


Рисунок 5.3 – Визначення положення, траєкторії та переміщення в кінематиці
Вочевидь, що:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (5.10)$$

Модуль вектора переміщення $|\Delta\vec{r}|$ дорівнює відстані між початковим та кінцевим положенням точки на траєкторії і в загальному випадку не дорівнює пройденому шляху S (рис. 5.10): $|\Delta\vec{r}| \leq S$. Але переміщення $d\vec{r}$ за нескінченно малий проміжок часу співпадає із відповідною нескінченно малою ділянкою траєкторії (рис. 5.11). Тому модуль вектора елементарного переміщення $|d\vec{r}|$ і пройдений точкою шлях dS збігаються:

$$|d\vec{r}| = dS. \quad (5.11)$$



Рисунок 5.4 – Елементарне переміщення

Сам вектор $d\vec{r}$ напрямлений за дотичною до траєкторії, отже, вказує напрям руху в цій точці траєкторії у відповідний момент часу.

Швидкість. Стан руху точки визначається не просто зміною її положення в просторі, а тим, як вона відбувається у часі. Наближено рух точки за деякий проміжок часу Δt характеризують відношенням здійсненого за цей час переміщення $\Delta\vec{r}$ до величини Δt , яке називають середнім вектором швидкості, або вектором середньої швидкості переміщення $\langle\vec{v}\rangle$:

$$\langle\vec{v}\rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (5.12)$$

Напрямок вектора $\langle\vec{v}\rangle$ співпадає з напрямом вектора переміщення (рис. 5.3), і його модуль:

$$|\langle\vec{v}\rangle| = \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}. \quad (5.13)$$

Слід зазначити, що вектор (5.12) є визначеним тільки для заданого проміжку часу Δt , тож для різних проміжків може довільно змінюватись як за модулем, так і за напрямком. Але при поступовому зменшенні величини Δt відношення $\Delta\vec{r}/\Delta t$ прямує до визначеної границі \vec{v} , яка є точною характеристикою руху в кожному мить і називається миттєвою швидкістю (або просто швидкістю):

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \equiv \dot{\vec{r}}(t) \equiv \dot{\vec{r}}(t). \quad (5.14)$$

Похідну за часом можна записувати по-різному. У виразі (5.14) наведено усі можливі варіанти запису.

Оскільки переміщення $\Delta \vec{r}$ є приростом радіуса-вектора, то миттєва швидкість є похідною від радіуса-вектора за часом. Вектор \vec{v} співнапрямлений із $d\vec{r}$, тобто вектор миттєвої швидкості напрямлений за дотичною до траєкторії в кожній її точці. Отже, вектор \vec{v} визначає не тільки як швидко, а й у якому напрямі переміщується тіло в кожен момент часу (вектор швидкості визначає стан руху тіла). Зокрема, поведінка вектора швидкості дає загальну інформацію про характер руху. Наприклад, якщо $\vec{v} = \text{const}$, тобто, ані величина, ані напрям швидкості не змінюються, то маємо рівномірний прямолінійний рух тіла. Якщо ж незмінною лишається тільки модуль вектора швидкості, то тіло здійснює рівномірний криволінійний рух, тощо.

У практичних задачах часто буває істотним не напрям руху, а лише швидкість подолання тілом шляху. Тому крім величин $\langle \vec{v} \rangle$ і \vec{v} використовують середню $\langle v \rangle$ та миттєву v скалярну, або шляхову швидкість, які означають через пройдений шлях аналогічно до співвідношень (5.12) і (5.14):

$$\langle v \rangle = \frac{S}{\Delta t}, \quad (5.15)$$

та

$$v = \frac{dS}{dt}. \quad (5.16)$$

Зауважимо, що із співвідношення (5.11) випливає, що миттєва шляхова швидкість v дорівнює модулю вектора миттєвої швидкості, але для середніх швидкостей це, загалом, не так.

Прискорення. Ще однією характеристикою руху є прискорення. Вектор миттєвого прискорення (або просто прискорення) \vec{a} визначає швидкість зміни вектора швидкості у часі й вводиться аналогічно до миттєвої швидкості:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \equiv \vec{v}'(t) \equiv \dot{\vec{v}}(t) \equiv \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{r}''(t) = \ddot{\vec{r}}(t), \quad (5.14)$$

тобто це похідна від вектора швидкості за часом, або ж друга похідна від радіуса-вектора за часом. У виразі (5.17) наведено усі варіанти запису другої похідної за часом.

Вектор прискорення збігається за напрямом з вектором $\Delta \vec{v}$ і в загальному випадку складає певний кут із напрямом швидкості (рис. 5.5). Якщо рух є рівнозмінним $\vec{a} = \text{const}$, то прискорення визначається р виразу:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}, \quad (5.18)$$

де $\Delta t = t_2 - t_1$ – проміжок часу, за який швидкість змінюється на величину $\Delta \vec{v}$.



Рисунок 5.5 – Напрямок вектора прискорення

При нерівномірній зміні швидкості цей вираз визначає середнє прискорення $\langle \vec{a} \rangle$ за час Δt .

Загальні рівняння кінематики точки. Коли задано закон руху точки, тобто – залежність радіуса-вектора від часу $\vec{r} = \vec{r}(t)$, то за допомогою співвідношень (5.12)-(5.18) легко знайти всі інші характеристики руху. Але на практиці найчастіше відоме прискорення $\vec{a} = \vec{a}(t)$, яке визначається законами динаміки, і завдання полягає у визначенні через нього решти кінематичних величин. Для цього існують загальні рівняння швидкості, переміщення (радіуса-вектора) та шляху. Вони встановлюються за допомогою методів інтегрального числення.

З виразу (1.17) випливає, що за проміжок часу dt це приріст вектора швидкості $d\vec{v} = \vec{a} \cdot dt$. Зміна швидкості за скінчений проміжок часу дорівнює сумі (точніше – інтегралу) усіх елементарних змін $d\vec{v}$:

$$\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \vec{a} dt. \quad (5.19)$$

Якщо розглядати проміжок часу від початкового $t=0$ до довільного моменту t , то з (5.19) отримаємо загальне рівняння швидкості:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \int_0^t \vec{a} dt, \quad (5.20)$$

де $\vec{v}_0 = \vec{v}(0)$ – початкова швидкість рухомої точки.

Аналогічними міркуваннями на основі співвідношення (5.14) встановлюються загальні рівняння для переміщення та радіуса-вектора:

$$d\vec{r} = \vec{v}dt,$$

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \vec{v}dt, \quad (5.21)$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v}dt, \quad (5.22)$$

де $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$ – початковий радіус-вектор, який визначає початкове положення рухомої точки.

Зауважимо, що для визначення швидкості та положення рухомої точки в будь-який момент часу замало знати лише прискорення $\vec{a} = \vec{a}(t)$. Необхідно також мати початкові умови, тобто знати величини \vec{r}_0 та \vec{v}_0 , котрі визначаються конкретною системою відліку, в якій розглядається рух.

Рівняння для пройденого точкою шляху встановлюється аналогічно через шляхову швидкість (модуль вектора швидкості) із співвідношення (5.16) $dS = vdt$:

$$S = \int_0^t vdt. \quad (5.23)$$

Підставляючи в отримані загальні рівняння заданий закон зміни прискорення $\vec{a} = \vec{a}(t)$, можна отримати рівняння кінематики для будь-якого конкретного виду руху. Нехай, наприклад, маємо рух із відомим сталим прискоренням $\vec{a} = \text{const}$. Тоді, згідно рівняння (5.20) маємо:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} \cdot \int_0^t dt \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (5.24)$$

Це відомий з елементарної фізики закон зміни швидкості при русі із сталим вектором прискорення. Підставивши отриманий вираз \vec{v} у рівняння (5.22), отримаємо відоме рівняння для радіуса-вектора за вказаного руху:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int_0^t (\vec{v}_0 + \vec{a}t)dt \Rightarrow \Delta\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2}. \quad (5.25)$$

Аналогічно можна й отримати рівняння кінематики для складніших рухів, у яких прискорення змінюється з часом.

5.2.2 Координатний спосіб опису руху

Векторні співвідношення компактно і повно відображують фізичний зміст величин та зв'язки між ними, але в розрахунках вектори треба задавати числами. Тому, окрім векторного, використовують координатний спосіб опису руху. В такому разі з тілом відліку жорстко зв'язують певну систему координат, найчастіше декартову, і положення точки в просторі визначають координатами – числами x, y, z . Ці числа дорівнюють відстаням (з тим, чи іншим знаком) від початку координат O до проєкції точки на відповідну координатну вісь (рис. 5.6, а). Відтак закон руху точки визначається рівняннями залежності координат від часу:

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t). \quad (5.26)$$



Рисунок 5.6 – Координатний спосіб опису руху

Очевидно, що декартові координати точки є проєкціями кінця радіуса-вектора на осі координат OX, OY, OZ : $x=r_x=r \cdot \cos\alpha$, $y=r_y=r \cdot \cos\beta$, $z=r_z=r \cdot \cos\gamma$ (де α, β, γ – «напрямні кути», тобто кути між напрямками радіуса-вектора \vec{r} та осей OX, OY, OZ – на рисунку 5.6, а показано лише один з них). Тому можна записати:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (5.27)$$

де \vec{i}, \vec{j} та \vec{k} – одиничні базисні вектори (орти), які визначають напрямки осей декартової системи координат (рис. 5.6, б).

Отже, знаючи координати точки, можна обчислити модуль її радіуса-вектора та, через напрямні косинуси, його напрям:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}. \quad (5.28)$$

Продиференціювавши вираз (5.27) за часом та врахувавши означення (5.14), отримаємо вираз швидкості точки в координатній формі:

$$\vec{v} = \vec{i} \frac{dx}{dt} + \vec{j} \frac{dy}{dt} + \vec{k} \frac{dz}{dt}. \quad (5.29)$$

Отже, похідні координат по часу – то є проекції вектора швидкості на відповідні осі:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (5.30)$$

Тому за заданим законом руху в координатній формі (5.26) можна визначити проекції вектора швидкості (5.29), а також його модуль і напрям:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}; \quad \cos\alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos\beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos\gamma = \frac{v_z}{v}. \quad (5.31)$$

Аналогічно визначаються й параметри вектора прискорення при координатному способі опису руху:

$$\vec{a} = \vec{i} \frac{dv_x}{dt} + \vec{j} \frac{dv_y}{dt} + \vec{k} \frac{dv_z}{dt} = \vec{i} a_x + \vec{j} a_y + \vec{k} a_z. \quad (5.32)$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}; \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}; \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (5.33)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}; \quad \cos\alpha = \frac{a_x}{a}, \quad \cos\beta = \frac{a_y}{a}, \quad \cos\gamma = \frac{a_z}{a}. \quad (5.34)$$

З усього сказаного впливає наступний загальний порядок (алгоритм) розв'язування векторних рівнянь. Спочатку векторне рівняння «проектується» на координатні осі, тобто замість нього записується відповідна система алгебраїчних рівнянь для проекцій. Потім із них визначаються проекції шуканих векторів і, нарешті, якщо необхідно, через знайдені проекції визначаються модулі та напрямки шуканих векторів. У нескладних ситуаціях деякі етапи описаного алгоритму необхідно виконувати автоматично. Як приклад, отримуємо з векторних рівнянь (5.20) і (5.22) рівняння для проекцій вектора швидкості та для координат точки через відомі проекції вектора прискорення:

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt, \quad v_y = v_{0y} + \int_0^t a_y dt, \quad v_z = v_{0z} + \int_0^t a_z dt. \quad (5.35)$$

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt, \quad y = y_0 + \int_0^t v_y dt, \quad z = z_0 + \int_0^t v_z dt. \quad (5.36)$$

Аналогічно з рівнянь (5.24) і (5.25) для руху із сталим прискоренням отримаємо:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \quad v_y = v_{0y} + a_y t, \quad v_z = v_{0z} + a_z t; \\ x &= x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad y = y_0 + v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}, \quad z = z_0 + v_{0z} t + \frac{a_z t^2}{2}. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Із цих рівнянь можна також отримати корисні для розв'язування задач співвідношення:

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x(x - x_0), \quad v_y^2 - v_{0y}^2 = 2a_y(y - y_0), \quad v_z^2 - v_{0z}^2 = 2a_z(z - z_0). \quad (5.38)$$

5.2.3 Природний спосіб описання руху

Цей спосіб є зручним при описі руху за заданою траєкторією. Положення точки на траєкторії задається криволінійною координатою, тобто відстанню l від обраного початку відліку O до цієї точки, відрахованою вздовж траєкторії. Позитивний напрям відліку криволінійної координати задається довільно, виходячи з міркувань зручності. Закон руху точки при цьому визначається залежністю криволінійної координати від часу $l = l(t)$. Зауважимо також, що модуль зміни криволінійної координати – то є пройдений точкою шлях.

Для задання напрямку руху і вектора швидкості точки з нею зв'язують одиничний вектор (орт) $\vec{\tau}$ дотичної до траєкторії, спрямований в бік збільшення координати (рис. 5.7). В такому разі можна записати:

$$\vec{v} = v_\tau \vec{\tau}, \quad (5.39)$$

де $v_\tau = \frac{dl}{dt}$ – проекція вектора швидкості на напрям $\vec{\tau}$. Швидкість v_τ є величиною алгебраїчною, її знак залежить від напрямку руху точки, а модуль дорівнює модулю вектора швидкості:

$$|v_\tau| = |\vec{v}| = v. \quad (5.40)$$



Рисунок 5.7 – Вектор напрямку швидкості

Вектор прискорення точки, котрий при такому способі опису називається повним прискоренням, відповідно до означення (5.17), виражається як:

$$\vec{a} = \frac{d(v_r \vec{\tau})}{dt} = \frac{dv_r}{dt} \vec{\tau} + v_r \frac{d\vec{\tau}}{dt}. \quad (5.41)$$

Таким чином, вектор повного прискорення має дві складові. Перша з них:

$$\vec{a}_r = \frac{dv_r}{dt} \vec{\tau}, \quad (5.42)$$

напрявлена по дотичній до траєкторії (рис. 5.8. в) і називається тангенціальним прискоренням. Воно визначає зміну модуля вектора швидкості точки. Тому для будь-якого рівномірного руху тангенціальне прискорення $\vec{a}_r = 0$.

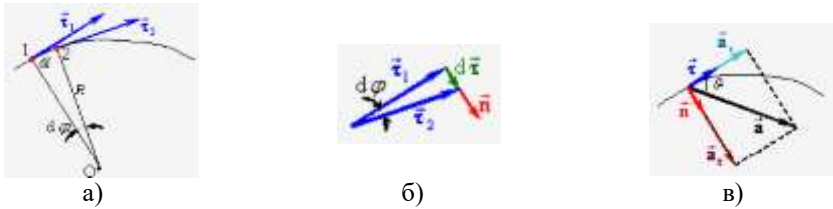


Рисунок 5.8 – Складові вектора повного прискорення

З'ясуємо зміст другої складової вектора повного прискорення, котра називається нормальним прискоренням:

$$\vec{a}_n = v_r \frac{d\vec{\tau}}{dt}. \quad (5.43)$$

Візьмемо до уваги те, що елементарна ділянка dl будь-якої кривої співпадає з дугою певного кола (кола кривизни) з відповідним центром (центром кривизни O) та радіусом R – радіусом кривизни (рис. 5.8, а). Врахувавши це, визначимо похідну $\frac{d\vec{\tau}}{dt}$. Приріст орта $\vec{\tau}$ зумовлений його поворотом на нескінченно малий кут $d\varphi$ під час переміщення точки за траєкторією на нескінченно малу відстань dl (рис. 5.8, а та б) за гранично малий проміжок часу dt . Очевидно, що при такому переміщенні кути повороту орта $\vec{\tau}$ і радіуса кривизни траєкторії R однакові, отже:

$$\left| \frac{d\vec{\tau}}{\tau} \right| = \frac{dl}{R} \Rightarrow |d\vec{\tau}| = \frac{dl}{R}. \quad (5.44)$$

Оскільки кут $d\varphi$ є нескінченно малим, то вектор $d\vec{\tau}$ напрямлений перпендикулярно до вектора $\vec{\tau}$ (рис. 5.8, б). Тому, якщо ввести орт (одиничний вектор) нормалі до траєкторії \vec{n} , то вектор $d\vec{\tau}$ можна подати у вигляді:

$$d\vec{\tau} = |d\vec{\tau}|\vec{n} = \frac{dl}{R}\vec{n}. \quad (5.45)$$

Поділивши цей вираз на dt , дістанемо:

$$\frac{d\vec{\tau}}{dt} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dl}{dt} \vec{n} = \frac{v}{R} \vec{n}. \quad (5.46)$$

Отже, за виразом (5.43), нормальне прискорення буде рівним:

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}. \quad (5.47)$$

Цей вектор напрямлений за нормаллю до центра кривизни траєкторії у кожній її точці. Він показує, як швидко повертається орт $\vec{\tau}$, тобто, як швидко змінюється напрям руху точки. Тому при прямолінійному русі $\vec{a}_n = 0$.

Повне прискорення \vec{a} (рис. 5.8, в) дорівнює сумі тангенціального та нормального прискорень:

$$\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n}. \quad (5.48)$$

Його модуль:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2 + \left(\frac{dv^2}{dt}\right)^2}. \quad (5.49)$$

Напрямок вектора повного прискорення визначається кутом \mathcal{G} (рис. 5.8. в), причому:

$$\operatorname{tg} \mathcal{G} = \frac{a_n}{a_\tau}. \quad (5.50)$$

5.3 Перетворення Галілея

Як уже говорилося, положення в просторі та рух точки є відносними, тобто вони є визначеними лише в обраній системі відліку. Відповідно, характеристики руху точки в двох різних системах відліку не однакові.

Розглянемо дві системи відліку із збіжними осями X та X' й однаково напрямленими іншими осями координат – нерухому K і рухому K' , що рухається зі швидкістю $\vec{V} = \text{const}$ відносно K -системи у додатному напрямку осей X та X' (рис. 5.9).

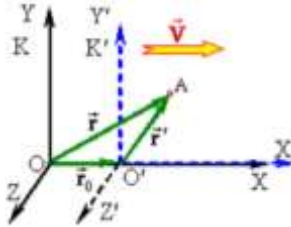


Рисунок 5.9 – Відносний рух у двох системах відліку

Вважатимемо також, що в початковий момент часу системи K і K' збігалися. Тоді в довільний момент t положення точки O' відносно O визначається радіусом-вектором $\vec{r}_0 = \vec{V}t$. Положення довільної точки A в K - і K' -системах визначаються радіусами-векторами \vec{r} та \vec{r}' , які пов'язані між собою наступним співвідношенням:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{r} - \vec{V}t, \quad (5.51)$$

або

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0 = \vec{r}' + \vec{V}t. \quad (5.52)$$

Ці співвідношення виражають перетворення Галілея у векторній формі. Вони дозволяють визначати положення точки в одній системі відліку, якщо відоме її положення в іншій. При цьому вважається самоочевидним, що час є абсолютним, тобто тривалість будь-яких процесів, приміром руху тіл, не залежить від системи відліку:

$$t = t'. \quad (5.53)$$

Перетворення Галілея в координатній формі, згідно з (5.27), мають вигляд:

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (5.54)$$

$$x = x' + Vt, \quad y = y', \quad z = z'. \quad (5.55)$$

Слід одразу зауважити, що ці співвідношення ґрунтуються на принципово хибних уявленнях про простір та час і є непридатними при швидкостях руху, сумірних із швидкістю поширення світла $c=3 \cdot 10^8$ м/с.

Взявши першу та другу похідну по часу від виразів (5.51) і (5.52), знайдемо формули перетворення швидкостей і прискорень:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}. \quad (5.56)$$

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}. \quad (5.57)$$

$$\vec{a}' = \vec{a}, \quad \vec{a} = \vec{a}'. \quad (5.58)$$

Зауважимо, що формули (5.57), (5.58), які називають ще законом додавання швидкостей, стосуються будь-яких систем відліку, але співвідношення (5.58), є чинними лише для описаних систем відліку, що рухаються одна відносно одної прямолінійно, рівномірно і поступально.

5.4 Сили в живій природі

Для визначення закону руху точки необхідно мати повну інформацію про діючі на неї сили, а для цього треба знати властивості сил і їхні математичні вирази (закони сил).

У макроскопічному світі спостерігається багато різних сил, але всі вони є проявами лише двох фундаментальних взаємодій – гравітаційної та електромагнітної (фундаментальними називають такі взаємодії, які не зводяться ні до яких інших. Окрім вказаних відомі ще два види фундаментальних взаємодій – сильна та слабка, – але в механічних явищах вони ніяк себе не виявляють). При цьому гравітація виявляє себе лишень у силі тяжіння, усі інші сили мають електромагнітну природу і зумовлені взаємодією між зарядженими частинками, з яких складаються молекули та атоми речовини. В механічних процесах найчастіше виявляють себе гравітаційна сила та сила тяжіння, пружна сила та вага тіла, сили тертя та опору.

5.4.1 Гравітаційна сила та сила тяжіння

Гравітаційна взаємодія є притаманною будь-яким матеріальним об'єктам і виявляється в тому, що всі тіла притягаються одне до одного. Згідно із законом всесвітнього тяжіння Ньютона гравітаційна сила притягання між двома матеріальними точками є прямо пропорційною їх масам m_1 , m_2 і обернено пропорційною квадратові відстані r між ними:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (5.59)$$

де $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ – гравітаційна стала, що показує «силу» гравітаційної взаємодії (G чисельно дорівнює силі притягування двох тіл масою по 1 кг на відстані 1 м одне від одного).

Отже, гравітаційні сили є гранично слабкими і відіграють істотну роль лише тоді, коли хоча б одне з тіл має астрономічну масу (планети та зірки).

Гравітаційна сила діє вздовж прямої, що з'єднує тіла – партнери взаємодії.

Варто звернути увагу на те, що величини m_1 і m_2 в законі всесвітнього тяжіння визначають не інертність тіл, а їхню здатність до взаємного притягування, тобто вони є гравітаційними масами, на відміну від інертних мас тіл, що фігурують у другому законі Ньютона. Встановлено, що гравітаційна та інертна маси є строго прямо пропорційні одна одній. Тому гравітаційну та інертну маси не розрізняють і говорять просто про масу тіла та вимірюють в одних і тих самих одиницях. Отже, фізична величина «маса» є і мірою інертності тіл, і мірою їхньої здатності до гравітаційної взаємодії.

Використовуючи формулу (5.59), слід пам'ятати, що вона є придатною тільки для матеріальних точок, тобто для тіл, які розташовані одне від одного на дуже великій відстані порівняно з їхніми розмірами. Виняток складає притягання двох однорідних куль (або кулі та матеріальної точки). В цьому випадку r – це відстань між центрами куль (або центром кулі та матеріальною точкою). Зокрема, це стосується сили тяжіння, тобто сили гравітаційного притягання, що діє на тіла поблизу поверхні планети. Згідно з формулою (5.59) вона визначається як:

$$F = G \frac{mM}{R^2}, \quad (5.60)$$

де m – маса тіла;

M та R – маса і радіус планети.

Гравітаційна сила є прямо пропорційною масі тіла, на яке діє. Тому біля поверхні планети вона надає всім тілам однакового прискорення сили тяжіння або прискорення вільного падіння (це не зовсім точно, оскільки на прискорення вільного падіння тіла відносно Землі дещо впливає її добове обертання та орбітальний рух):

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (5.61)$$

яке напрямлене вертикально вниз. Для Землі наближено $g=9,8 \text{ м/с}^2$. З урахуванням (5.61) силу тяжіння записують у вигляді:

$$\vec{F} = m\vec{g}. \quad (5.62)$$

5.4.2 Сила пружності

Пружна сила (сила пружності) виникає при пружних деформаціях тіл, наприклад, при розтягу пружини, або еластичного шнура чи стержня (пружними називають деформації, котрі зникають після припинення дії сили, що їх спричинює). Вона зумовлена дією електромагнітних сил взаємодії між молекулами деформованого тіла. Пружна сила завжди напрямлена протилежно до напрямку деформації й за модулем є прямо пропорційною величині деформації (закон Гука). Для деформації розтягу чи стискання величина (модуль) пружної сили:

$$F = k \cdot \Delta l, \quad (5.63)$$

де $\Delta l = |l - l_0|$ – величина деформації;

l та l_0 – довжина деформованої та недеформованої пружини, відповідно;

k – коефіцієнт пропорційності, який називають жорсткістю тіла.

Для стержня (шнура) або пружини довжиною l із сталим перерізом s :

$$k = E \frac{S}{l}, \quad (5.64)$$

де E – так званий модуль Юнга, що є табличною характеристикою пружних властивостей речовини тіла.

У такому разі вираз закону Гука можна подати у вигляді:

$$\sigma = E \cdot e \text{ або } e = \sigma \cdot E \quad (5.65)$$

де $e = \Delta l / l_0$ – відносна деформація;

$\sigma = F / s$ – механічна напруженість, що виникає в тілі внаслідок деформації.

5.4.3 Маса та невагомість

Якщо тіло лежить на опорі (чи підвішене на шнурі), то через його притягання до Землі виникає деформація як опори (підвісу), так і самого тіла. Як наслідок, з'являються сили взаємодії між тілом і опорою (підвісом).

Сила, що діє з боку тіла на горизонтальну опору або вертикальний підвіс унаслідок притягання до Землі називається вагою тіла \vec{P} (рис. 5.10).

Відповідно, сила, що діє на тіло з боку опори (підвісу) називається реакцією опори \vec{N} або підвісу \vec{T} . Отже вага тіла прикладена не до нього, а до опори чи

підвісу. Якщо опора (підвіс), ото ж і тіло, не має прискорення відносно інерційної системи відліку, то $m\vec{g} + \vec{N} = 0$ і, оскільки $\vec{N} = -\vec{P}$ то:

$$\vec{P} = m\vec{g}, \quad (5.66)$$

тобто, вага тіла дорівнює силі тяжіння, що діє на нього (з цієї причини силу тяжіння інколи теж називають вагою). Але, коли опора (підвіс) має прискорення \vec{a} , то згідно з другим і третім законами Ньютона $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{g} - \vec{P}$, то:

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}). \quad (5.67)$$

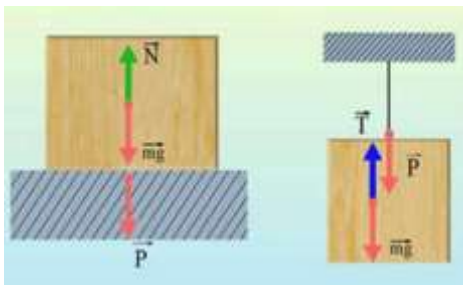


Рисунок 5.10 – Взаємодія сил ваги

Отже, вага залежить від прискорення опори і може бути або більшою (при русі вгору), або меншою (при русі вниз), ніж mg . Зокрема, коли опора (підвіс) рухається вниз із прискоренням $\vec{a} = \vec{g}$, то $\vec{P} = 0$, і тіло перебуває в невагомості.

При цьому $\vec{N} = 0$, тобто в стані невагомості на тіло діє тільки сила тяжіння. Із залежністю ваги від прискорення опори ми повсякденно стикаємося в ліфті, але особливо відчутно це для космонавтів: вони зазнають великих перевантажень при виході ракети на орбіту та перебувають у невагомості протягом усього часу орбітального польоту.

5.4.4 Сили тертя та опору

Відомо, що при ковзанні даного тіла по поверхні іншого, або ж при спробах такого руху виникає сила, що перешкоджає рухові. Цю силу називають силою сухого тертя. Якщо при спробі примусити одне тіло ковзати по поверхні іншого закріпленого тіла перше залишається у спокої, то тертя, що виникає, називають тертям спокою. Якщо ж тіла рухаються одне відносно одного, то залежно від характеру руху говорять про тертя ковзання, або тертя кочення. Тертя між частинами одного й того ж тіла при їх відносному русі, наприклад, тертя між

сусідніми шарами рідини чи газу, що рухаються із різними швидкостями, називають внутрішнім тертям.

Властивості сили тертя визначаються умовами, за яких вона виникає. Зокрема, сила тертя спокою \vec{F}_c дорівнює сумі векторів решти сил (рівнодійній), що діють на дане тіло, взятій зі знаком мінус:

$$\vec{F}_c = -\sum_i \vec{F}_i. \quad (5.68)$$

У цьому легко впевнитися на основі другого закону Ньютона. Якщо тіло знаходиться у спокої, то його прискорення $\vec{a} = 0$, отже і сума сил, що діють на тіло $\sum (\vec{F}_i + \vec{F}_c) = 0$, звідси q випливає вираз (5.68)).

Окрім того, в дослідах встановлено, що величина сили тертя спокою не може перевищувати певного максимального значення:

$$\vec{F}_{c_{\max}} = \mu \cdot N, \quad (5.69)$$

де μ – коефіцієнт тертя, який залежить від природи і стану дотикових поверхонь (зокрема їх шорсткості);

N – сила нормального тиску, що притискає дане тіло до поверхні іншого.

Якщо рівнодійна решти сил, прикладених до тіла, перевищує значення $F_{c_{\max}}$, то це тіло починає рухатися по поверхні іншого, і тертя спокою змінюється на тертя ковзання. Величина сили тертя ковзання F_T досить складно залежить від відносної швидкості тіл (рис. 5.11, а), але при достатньо малих швидкостях її можна вважати сталою (рис. 5.11, б) і рівною максимальній силі тертя спокою:

$$F_T = \mu \cdot N. \quad (5.70)$$

Сила опору $\vec{F}_{\text{оп}}$ виникає при русі тіла в газоподібному чи рідкому середовищі й зумовлена взаємодією його молекул із молекулами поверхні тіла та тертям між шарами самого середовища (в'язкостю). При цьому через велику рухливість молекул газу та рідини при русі в середовищі немає тертя спокою.

Сила опору спрямована проти руху тіла й істотно залежить від його швидкості відносно середовища. При малих швидкостях можна вважати, що:

$$F_{\text{оп}} = \alpha \cdot v \cdot \vec{e}_v, \quad (5.71)$$

де α – стала величина (коефіцієнт опору), залежна від характеристик тіла і середовища;

\vec{e}_v – орт вектора швидкості (при великих швидкостях ця залежність є близькою до квадратичної, а при надзвукових – до кубічної).



Рисунок 5.11 – Відношення сили тертя до швидкості

Характерною властивістю сил опору є їх велика залежність від форми рухомого тіла. Тому рухомими апаратами (авто, літаки, ракети, тощо) надають специфічної обтічної форми.

5.5 Кінематика твердого тіла

Різні точки твердого тіла рухаються не однакою, тому механіка твердого тіла набагато складніша за механіку точки. Рух твердих тіл можна поділити на такі різновиди:

- поступальний рух;
- обертання навколо нерухомої осі;
- плоский рух;
- обертання навколо нерухомої точки;
- вільний рух.

Основними при цьому є поступальний і обертальний рухи, оскільки, як виявляється, інші різновиди руху твердого тіла можна розглядати як сукупність цих двох.

Поступальним називають рух, при якому довільна пряма, проведена між двома точками тіла, залишається паралельною до свого початкового напрямку.

Обертальним називають такий рух твердого тіла, коли в будь-яку мить усі його точки рухаються по колах із центрами на одній прямій – осі обертання, – що проходить через тіло.

При поступальному русі всі точки тіла рухаються по однакових за формою траєкторіях і в кожен момент часу мають однакову швидкість і прискорення. Отже, поступальний рух тіла визначається рухом будь-якої однієї його точки. Тому розглянута кінематика точки одночасно є й кінематикою поступального руху твердого тіла.

5.5.1 Обертальний рух твердого тіла

Нехай маємо якесь тіло, що обертається навколо нерухомої осі OZ (рис. 5.12). Розглянемо деяку його точку, котра рухається по коловій траєкторії з центром у точці C і радіусом R. Задамо положення точки радіусом-вектором \vec{r} із початком в точці O на осі обертання. За час dt точка здійснює переміщення $d\vec{r}$, яке є перпендикулярним до \vec{r} і має модуль:

$$|d\vec{r}| = R d\varphi = r d\varphi \sin \vartheta, \quad (5.72)$$

де $d\varphi$ – кут повороту тіла навколо осі обертання за час dt.

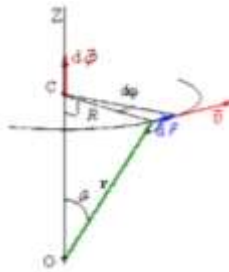


Рисунок 5.12 – Рух тіла по коловій траєкторії

Це співвідношення можна подати у векторній формі так, що воно буде відображати й напрям обертання тіла. Для цього величину $d\varphi$ розглядають як модуль вектора елементарного кута повороту $d\vec{\varphi}$, який напрямлений уздовж осі обертання згідно з правилом правого гвинта.

За цим правилом вектор $d\vec{\varphi}$ спрямований у напрямку вкручування правого гвинта при його обертанні в напрямку обертання тіла; подібні вектори називаються аксіальними. Зауважимо також, що зображувати векторами можна лише нескінченно малі повороти.

У такому разі замість виразу (5.72) можна записати:

$$d\vec{r} = [d\vec{\varphi}, \vec{r}] \quad (5.73)$$

Швидкість руху точки отримаємо, поділивши $d\vec{r}$ на dt:

$$\vec{v} = \left[\frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \vec{r} \right]. \quad (5.74)$$

З цього виразу видно, що різні точки обертового тіла рухаються з різними швидкостями, але перший множник під знаком векторного добутку, однаковий для всіх точок, і тому визначає рух не лишень окремої точки, а й усього тіла. Вектор:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \quad (5.75)$$

називається кутовою швидкістю тіла і є кількісною характеристикою обертального руху.

Вектор $\vec{\omega}$, як і $d\vec{\varphi}$, напрямлений уздовж осі обертання згідно з правилом правого гвинта. Одиницею кутової швидкості є 1 рад/с.

Зміна вектора кутової швидкості з часом характеризується вектором кутового прискорення $\vec{\beta}$:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (5.76)$$

Одиницею кутового прискорення є 1 рад/с².

Під час обертання навколо фіксованої осі вектор $\vec{\beta}$, так само як і вектор $\vec{\omega}$, напрямлений уздовж осі обертання (рис. 5.13).

У такому разі зручніше використовувати не вектори, а їхні проєкції на вісь обертання OZ, напрям якої пов'язаний із позитивним напрямом відліку кута повороту правилом правого гвинта:

$$\omega_z = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \beta_z = \frac{d\omega_z}{dt}. \quad (5.77)$$

При цьому знак ω_z визначає напрям обертання, а знак β_z – характер обертання (рисунок 5.13 відображає прискорене обертання в додатному напрямі осі OZ).

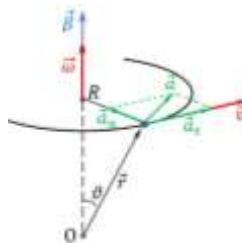


Рисунок 5.13 – Обертання тіла навколо фіксованої осі

Якщо під час руху вісь обертання змінює напрям, то $d\vec{\omega}$ і $\vec{\beta}$ напрямлені під кутом до осі.

Окремим важливим для практики випадком обертального руху є рівномірне обертання тіла навколо фіксованої осі ($\vec{\beta} = 0$, $\vec{\omega} = \text{const}$). Такий рух є періодичним, отож окрім кутової швидкості його характеризують періодом T – проміжком часу, за який здійснюється один оберт, – і частотою обертання n – кількістю обертів за одиницю часу.

Оскільки за один оберт тіло повертається на кут 2π , то:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{і} \quad n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (5.78)$$

5.5.2 Зв'язок між лінійними та кутовими величинами

Під час розгляду обертального руху окремих точок твердого тіла величини $d\vec{r}$ і \vec{v} відповідно називають лінійним переміщенням і лінійною швидкістю, на відміну від кутового переміщення $d\vec{\phi}$ та кутової швидкості $\vec{\omega}$. Між лінійними та кутовими величинами існують однозначні зв'язки. Зокрема, зв'язок між елементарними лінійним і кутовим переміщеннями задається виразами (5.72) і (5.73), а зв'язок між лінійною та кутовою швидкістю – виразом (5.74) із урахуванням означення (5.75):

$$\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{r}]. \quad (5.79)$$

Для модулів маємо:

$$v = \omega r \sin \vartheta = \omega R, \quad (5.80)$$

де $R = r \sin \vartheta$ – радіус кола за яким рухається точка (рис. 5.13).

Вираз для повного прискорення точки через кутові величини знайдемо диференціюванням виразу (5.79):

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \left[\frac{d\vec{\omega}}{dt}, \vec{r} \right] + \left[\vec{\omega}, \frac{d\vec{r}}{dt} \right] = [\vec{\beta}, \vec{r}] + [\vec{\omega}, \vec{v}], \quad (5.81)$$

де враховано, що $\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{\beta}$ – вектор кутового прискорення, а $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$ – вектор лінійної швидкості.

Оскільки при обертанні тіла навколо нерухомої осі вектори $\vec{\omega}$ і $\vec{\beta}$ лежать на осі, то вектор $[\vec{\beta}, \vec{r}]$ напрямлений по дотичній до траєкторії даної точки тіла

(рис. 5.132) і є її тангенціальним прискоренням \vec{a}_τ :

$$\vec{a} = [\vec{\beta}, \vec{r}] \quad (5.82)$$

При цьому тангенціальне прискорення даної точки тіла, що обертається, називається лінійним прискоренням цієї точки. Його проекція на напрям дотичної до кола

$$a_\tau = \beta_z r \sin \vartheta = \beta_z R. \quad (5.83)$$

Так само друга складова повного прискорення $[\vec{\omega}, \vec{v}]$ при нерухомій осі обертання напрямлена по нормалі до траєкторії точки (рис. 5.13), то є її нормальним прискоренням:

$$\vec{a}_n = [\vec{\omega}, \vec{v}] \quad (5.84)$$

Модуль нормального прискорення:

$$\vec{a}_n = [\vec{\omega}, \vec{v}] \quad (5.85)$$

На основі співвідношень (5.83) і (5.85) можна визначити модуль і напрям (рис. 5.13) повного прискорення точок обертового тіла:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = R\sqrt{\beta^2 + \omega^4}, \quad (5.86)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega^2}{\beta}. \quad (5.87)$$

5.5.3 Загальні рівняння кінематики обертального руху

Кутове прискорення тіла, як і прискорення окремої матеріальної точки, визначається силовою дією на обертове тіло з боку інших тіл, отож його можна знайти, аналізуючи фізичні умови, в яких здійснюється обертання. Тому основне завдання кінематики обертального руху тіла полягає у визначенні інших кутових величин через відоме кутове прискорення. Під час обертання навколо нерухомої осі це завдання розв'язується так само, як і в кінематиці точки. При цьому слід заважити, що за загальним змістом і формальними означеннями кутові величини – переміщення $d\vec{\varphi}$, швидкість $\vec{\omega}$ і прискорення $\vec{\beta}$ – є аналогами відповідних лінійних величин, які характеризують рух матеріальної точки. Тому й зв'язки між кутовими величинами такі самі, як і між лінійними. Через це всі основні рівняння кінематики обертального руху навколо фіксованої осі аналогічні відповідним рівнянням кінематики руху точки у фіксованому

напрямку (прямолінійного руху). Зокрема, проекція кутової швидкості визначається загальним рівнянням, аналогічним рівнянню v_z із (5.35):

$$\omega_z = \omega_{0z} + \int_0^t \beta_z dt, \quad (5.88)$$

де ω_{0z} – проекція початкової кутової швидкості;

β_z – проекція кутового прискорення на напрям осі обертання.

У простому випадку рівнозмінного обертання $\beta_z = \text{const}$, отже,

$$\omega_z = \omega_{0z} + \beta_z \int_0^t \beta_z dt \Rightarrow \omega_z = \omega_{0z} + \beta_z t, \quad (5.89)$$

що аналогічно до (5.37).

Кут повороту (кутове переміщення) φ , який визначає зміну положення тіла відносно осі обертання, знаходиться із загального рівняння:

$$\varphi = \int_0^t \omega_z dt. \quad (5.90)$$

Це рівняння теж є аналогом рівнянь (5.36) кінематики точки, що визначають зміну положення точки відносно вибраного початку відліку.

При рівнозмінному обертанні $\beta_z = \text{const}$, $\omega_z = \omega_{0z} + \beta_z t$, отже,

$$\varphi = \int_0^t (\omega_{0z} + \beta_z t) dt \Rightarrow \varphi = \omega_{0z} t + \frac{\beta_z t^2}{2}. \quad (5.91)$$

Слід зауважити, що в рівняннях (5.88)-(5.90) величина φ є алгебраїчною, тож число $\frac{\varphi}{2\pi}$ не визначає кількості обертів N (повний «шлях»), зроблених тілом за час t (виняток становить тільки обертання тіла в незмінному напрямі, коли φ не змінює знаку протягом заданого часу руху). В загальному випадку кількість обертів тіла визначається через модуль кутової швидкості рівнянням:

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^t \omega dt, \quad (5.92)$$

яке є аналогом рівняння шляху (5.23) в кінематиці матеріальної точки.

5.5.4 Плоский рух твердого тіла. Миттєва вісь

Плоским рухом називається такий рух, при якому всі точки тіла

переміщуються в площинах, паралельних до певної нерухомої в обраній системі відліку площини. Такі площини, для зручності, умовно називають «площинами руху» точок тіла. Прикладом плоского руху може бути кочення циліндра: всі його точки рухаються в перпендикулярних до осі площинах.

Швидкість точки тіла при плоскому русі. Нехай якесь тіло здійснює плоский рух. Прослідкуємо за відрізком АВ, який з'єднує дві точки цього тіла, що знаходяться в площині руху. За деякий проміжок часу відрізок із положення A_1B_1 , переміщується в положення A_2B_2 (рис. 5.14).



Рисунок 5.14 – Швидкість тіла за плоского руху

Цю зміну положення можна розглядати як результат поступального переміщення в положення A_2B' і повороту в площині руху на деякий кут φ навколо точки А (рис. 5.14, а). Але так само можна говорити про поступальне переміщення відрізка в положення $A'B_2$ та поворот навколо точки В (рис. 5.14, б). При цьому переміщення точок А і В – A_1A_2 і B_1B_2 – не однакові, але кут повороту φ один і той самий. Зрозуміло, що сказане вірно й для будь якої іншої пари точок і для будь-якого проміжку часу, зокрема, й для нескінченно малого. Тому плоский рух твердого тіла можна розглядати як сукупність поступального руху та обертання навколо фіксованої осі перпендикулярної до площин руху точок тіла. При цьому кутова швидкість обертання тіла не залежить від вибору такої осі.

Взявши до уваги сказане, розглянемо рух довільної точки А тіла, що здійснює плоский рух в системі відліку XOY (К-система) так, що точки тіла рухаються в площинах, паралельних XOY (рис. 5.15).

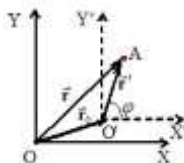


Рисунок 5.15 – Плоский рух у двох системах відліку

Пов'яжемо з тілом рухоми систему відліку $X'O'Y'$ (K' -система), положення початку відліку котрої O' в K -системі визначається радіусом-вектором \vec{r}_0 . Положення точки A відносно K -системи відліку визначається радіусом-вектором \vec{r} , а відносно K' -системи – радіусом-вектором \vec{r}' . Очевидно, що:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}'. \quad (5.93)$$

Переміщення точки A за нескінченно малий проміжок часу dt :

$$d\vec{r} = d\vec{r}_0 + d\vec{r}'. \quad (5.94)$$

Переміщення \vec{r}' зумовлене поворотом тіла навколо осі, що проходить через точки O' , тому $d\vec{r}' = [d\vec{\varphi}, \vec{r}']$ (за (5.73)). Отже:

$$d\vec{r} = d\vec{r}_0 + [d\vec{\varphi}, \vec{r}'] \quad (5.95)$$

Поділивши останній вираз на проміжок часу dt , отримаємо швидкість точки A в K -системі відліку:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + [\vec{\omega}, \vec{r}'] \quad (5.96)$$

Таким чином, при плоскому русі швидкість довільної точки A твердого тіла складається із швидкості \vec{v}_0 будь-якої іншої точки O' , що жорстко зв'язана з ним (така точка може розміщуватись і поза тілом), і лінійної швидкості $\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{r}']$ обертального руху точки A навколо осі, що проходить через точку O' перпендикулярно до площини руху.

Миттєва вісь. Оскільки вибір точки O' є довільним, плоский рух тіла можна звести до чисто обертального. Справді, при плоскому русі вектори \vec{v}_0 і \vec{v}' перпендикулярні до вектора кутової швидкості $\vec{\omega}$, отже обидва лежать в одній площині руху. Тому в кожному митті існує така жорстко зв'язана з тілом точка M , миттєва швидкість якої \vec{v}' в K -системі рівна нулю. Її радіус-вектор \vec{r}'_m визначається із співвідношення (5.96):

$$\vec{v}' + [\vec{\omega}, \vec{r}'] = 0 \Rightarrow [\vec{\omega}, \vec{r}'_m] = -\vec{v}'_0. \quad (5.97)$$

Зокрема, модуль \vec{r}'_m , тобто відстань між точками M і O' , дорівнює:

$$\vec{r}'_m = \frac{v_0}{\omega}. \quad (5.98)$$

За потреби детальнішої інформації про положення миттєвої осі вираз (5.97) слід розписати в координатній формі за правилами розкриття векторного добутку.

Оскільки точка M у дану мить є нерухомою, то рух тіла в цей момент можна трактувати як чисте обертання навколо осі, що проходить через цю точку перпендикулярно до площини руху. Таку вісь називають миттєвою віссю. В загальному випадку положення миттєвої осі може змінюватися з часом. Наприклад, при коченні циліндра без ковзання по плоскій поверхні миттєва вісь збігається з лінією дотику циліндра до поверхні й рухається із швидкістю осі циліндра. Поняття миттєвої осі є досить продуктивним, оскільки в багатьох випадках спрощує аналіз плоского руху.

5.6 Неінерційні системи відліку

5.6.1 Сили інерції

Сили, які зумовлені не взаємодією між тілами, а властивостями системи відліку, називають силами інерції. Зауважимо, у зв'язку з тим, що сили інерції визначаються не взаємодією між тілами, деякі автори називають їх фіктивними.

З урахуванням сил інерції дозволяє поширити основне рівняння динаміки (5.7) або (5.9) і на неінерційні системи відліку.

Розглянемо сили інерції, які виникають при поступальному русі системи відліку. Нехай є дві системи відліку: нерухома інерційна K -система та K' -система, яка рухається поступально із прискоренням \vec{a}_0 відносно K -системи вздовж її осі OX (рис. 5.1). Якщо тіло рухається відносно K -системи зі швидкістю \vec{v} , то його швидкість відносно K' -системи, за (5.56):

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}, \quad (5.99)$$

де \vec{V} – швидкість K' -системи відносно K в дану мить.

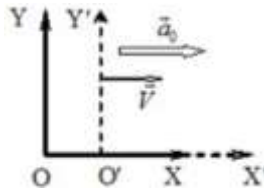


Рисунок 5.16 – Рух тіла в K - та K' -системах

Звідси, відповідно до (5.17):

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_0, \quad (5.100)$$

де \vec{a}' – прискорення тіла відносно неінерційної системи відліку K' ;

\vec{a} – його прискорення відносно інерційної системи відліку K ;

\vec{a}_0 – прискорення K' -системи відліку відносно K .

Домноживши вираз (5.100) на масу тіла m , отримаємо:

$$m\vec{a}' = m\vec{a} - m\vec{a}_0, \quad (5.101)$$

Величина $m\vec{a} = \vec{F}$ – то є «звичайна» сила, яка діє на тіло в інерційній системі відліку з боку інших тіл. Але прискорення тіла в K' -системі відліку визначається не тільки цією силою, а ще й величиною:

$$\vec{F}_i = -m\vec{a}_0, \quad (5.102)$$

яка називається (поступальною) силою інерції. Ця сила зумовлена прискоренням рухом K' -системи відліку, отже, вона не пов'язана із взаємодією даного тіла з іншими тілами. Тому для сили інерції третій закон Ньютона не виконується. Іншою характерною особливістю сили інерції є те, що вона визначається добутком маси тіла не на його прискорення, а на прискорення системи відліку.

Введення сили інерції дозволяє поширити основне рівняння динаміки й на поступальні неінерційні системи відліку:

$$m\vec{a}' = \vec{F} - \vec{F}_i, \quad (5.103)$$

де \vec{F} – рівнодійна сил, які діють на тіло з боку інших тіл і полів;

\vec{F}_i – сила інерції.

5.6.2 Загальне рівняння руху точки в неінерційних системах відліку

У кінематиці говориться про те, що довільний рух твердого тіла можна трактувати як сукупність поступального та обертального рухів. Тому в довільній неінерційній системі відліку на тіла, окрім сил взаємодії, діють усі розглянуті види сил інерції. Відповідно, основні рівняння руху (5.7) і (5.9) у довільній неінерційній системі відліку мають вигляд:

$$m\vec{a}' = \vec{F} - m\vec{a}_0 + m\omega^2\vec{r} + 2m[\vec{v}', \vec{\omega}], \quad (5.104)$$

$$\frac{d\vec{r}'}{dt^2} = \frac{\vec{F}}{m} - \vec{a}_0 + \omega\vec{r} + 2[\vec{v}', \vec{\omega}], \quad (5.105)$$

де \vec{a}_0 і $\vec{\omega}$ – поступальне прискорення та кутова швидкість системи відліку.

Два інші доданки являють собою відцентрове прискорення:

$$\vec{a}_{\text{вц}} = \omega^2\vec{r}, \quad (5.106)$$

та коріолісове прискорення:

$$\vec{a}_{\text{к}} = 2[\vec{v}', \vec{\omega}], \quad (5.107)$$

5.7 Динаміка систем

5.7.1 Імпульс системи

Нагадаємо, що імпульсом системи називають адитивну величину, котра дорівнює сумі імпульсів усіх тіл системи:

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i m\vec{v}_i. \quad (5.108)$$

Розглянемо поведінку імпульсу в найпростішій системі, що складається всього з двох матеріальних точок (частинок) 1 і 2, які взаємодіють із силами \vec{F}_{12} та \vec{F}_{21} і на які діють зовнішні сили \vec{F}_1 і \vec{F}_2 (рис. 5.17).

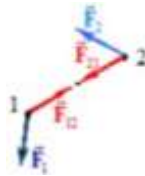


Рисунок 5.17 – Поведінка імпульсу в найпростішій системі

Рух кожної частинки визначається рівнянням (5.4), отже зміна імпульсу системи виражається, як

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_{12} + \vec{F}_2 + \vec{F}_{21}. \quad (5.109)$$

Але, згідно з третім законом Ньютона (5.8), $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0$, тому:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_i. \quad (5.109)$$

У системі, що складається з багатьох частинок, співвідношення (5.8) виконується для будь-якої пари частинок. Тому отриманий результат зберігає чинність, і можна записати:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}, \quad (5.110)$$

де величину $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$ назвемо сумарною зовнішньою силою, яка діє на тіла системи. Зауважимо, що величину \vec{F} не можна розглядати як «рівнодійну» за винятком ситуації, коли лінії дії всіх зовнішніх сил перетинаються в одній точці.

Таким чином швидкість зміни імпульсу довільної системи дорівнює сумарній зовнішній силі, що діє на систему.

Це твердження й рівняння (5.110) інколи називають законом зміни імпульсу системи. Воно виражає той дуже важливий факт, що, на відміну від окремих частинок, імпульс усієї системи здатні змінювати лише зовнішні сили. Сили інерції, що діють на тіла в неінерційних системах відліку, відносяться до зовнішніх сил.

Зміна імпульсу системи за скінчений проміжок часу $[t_1, t_2]$ визначається повним імпульсом зовнішніх сил за цей проміжок:

$$\Delta\vec{P} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt. \quad (5.111)$$

5.7.2 Закон збереження імпульсу

Якщо система замкнена (зовнішні сили \vec{F}_i відсутні), то в рівнянні (5.110) $\vec{F} = 0$, отже:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = 0 \Rightarrow \vec{P} = \text{const}. \quad (5.112)$$

У цьому полягає закон збереження імпульсу: імпульс замкненої системи зберігається, тобто залишається незмінним у часі.

При цьому імпульси окремих частинок системи можуть змінюватися внаслідок взаємодії між собою, але лише так, що імпульс системи лишається незмінним. Іншими словами, взаємодія між тілами призводить тільки до обміну

імпульсами без зміни сумарного імпульсу системи. Тому рівняння (5.112) розгорнуто можна записати так:

$$m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 + \dots = m_1 \vec{v}''_1 + m_2 \vec{v}''_2 + \dots, \quad (5.113)$$

де ліва та права частини відносяться до двох довільних моментів часу.

З наведених міркувань і викладок можна зробити висновок, що закон збереження імпульсу є наслідком законів Ньютона, і це цілком природньою. Але, як це нерідко буває в науці, наслідок може виявитися більш глибоким і загальним, ніж положення, із яких його отримано. І справді, закон збереження імпульсу є одним із небагатьох абсолютних фізичних законів. Він виконується не лише в механічних, а й у будь-яких ізольованих фізичних системах і за будь-яких умов. Наприклад, закон збереження імпульсу виконується в електромагнітних полях та у квантових системах, хоча і в першому, і в другому випадку закони Ньютона взагалі не є чинними. Це саме стосується й систем, в яких частинки рухаються із субсвітловими швидкостями. Така універсальність робить закон збереження імпульсу дуже важливим як для теорії, так і для практики. Зокрема, при розгляді маловивчених систем він дозволяє одразу відкидати всі гіпотетичні процеси, в яких не виконується умова (5.110).

Практична цінність закону збереження імпульсу визначається тим, що умова збереження імпульсу $\vec{F} = 0$, може точно чи наближено виконуватись і в незамкнених системах. Це можливо у таких випадках:

- зовнішні сили є компенсованими;
- в системі імпульси окремих тіл змінюються протягом невеликого проміжку часу під дією дуже великих внутрішніх сил, так що можна нехтувати зовнішніми силами, тобто вважати, що $\vec{F} = 0$;
- якщо вектор сумарної зовнішньої сили \vec{F} має незмінний напрям, скажімо, вертикальний ОУ, то її проекція на будь-який горизонтальний напрям ОХ ($F_x = 0$).

5.8 Робота та енергія

Поняття роботи та енергії є фундаментальними категоріями класичної механіки, які дозволяють описувати взаємодію тіл не через сили та прискорення (динамічний підхід), а через зміну стану системи. Повсякденне розуміння «роботи» часто відрізняється від фізичного. У фізиці механічна робота виконується лише тоді, коли на тіло діє сила і воно під дією цієї сили переміщується. Якщо ми тиснемо на нерухому стіну, ми витрачаємо біологічну енергію, але з точки зору механіки робота дорівнює нулю.

Математично механічна робота (A) постійної сили (F) визначається як скалярний добуток вектора сили на вектор переміщення (s):

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha, \quad (5.114)$$

де α – кут між напрямком сили та напрямком переміщення.

Одиницею вимірювання роботи в системі SI є джоуль (Дж), який дорівнює роботі сили в 1 Н під час переміщення тіла на 1 метр (1 Дж=1 Н·м).

Важливо зауважити, що робота може бути додатньою (якщо кут гострий), від'ємною (якщо кут тупий, наприклад, робота сили тертя) або дорівнювати нулю (якщо сила перпендикулярна до руху, як у випадку сили реакції опори під час руху по горизонталі).

Якщо сила змінюється під час руху, роботу визначають через інтеграл. Графічно роботу можна представити як площу фігури під кривою залежності сили від координати. Швидкість виконання роботи характеризується потужністю (N). Потужність – це скалярна величина, яка дорівнює відношенню роботи до часу, за який вона була виконана:

$$N = \frac{A}{t}. \quad (5.115)$$

У миттєвому значенні потужність дорівнює добутку сили на швидкість тіла:

$$N = F \cdot v. \quad (5.116)$$

Одиниця потужності – ват (Вт).

Тісно пов'язаним із роботою є поняття енергії. Енергія – це універсальна міра різних форм руху та взаємодії матерії. У механіці енергія визначає здатність тіла або системи тіл виконати роботу. Робота в такому контексті є процесом зміни енергії. Механічна енергія поділяється на два основні види: кінетичну та потенціальну.

Кінетична енергія E_k – це енергія руху. Вона залежить від маси тіла m та його швидкості v :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (5.117)$$

Теорема про кінетичну енергію стверджує, що робота рівнодійної всіх сил, прикладених до тіла, дорівнює зміні його кінетичної енергії: $A = E_{k2} - E_{k1}$. Це

означає, що для зупинки тіла, яке рухається, необхідно виконати від'ємну роботу, яка за модулем буде дорівнювати його початковій кінетичній енергії.

Потенціальна енергія E_n зумовлена взаємодією тіл або частин тіла між собою і залежить від їх взаємного розташування. Для тіла, піднятого над землею на висоту h , потенціальна енергія в полі тяжіння обчислюється як:

$$E_n = m \cdot g \cdot h, \quad (5.118)$$

де $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Важливо пам'ятати, що значення потенціальної енергії залежить від вибору нульового рівня (точки відсвіту). Робота сили тяжіння не залежить від форми траєкторії, а лише від початкової та кінцевої висоти, тому сила тяжіння називається консервативною (або потенціальною) силою. Робота таких сил завжди дорівнює зміні потенціальної енергії, взятій з протилежним знаком:

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}). \quad (5.119)$$

Іншим прикладом є потенціальна енергія пружно деформованого тіла (наприклад, стиснутої пружини):

$$E_n = \frac{kx^2}{2}, \quad (5.120)$$

де k – жорсткість пружини
 x – величина деформації.

Сума кінетичної та потенціальної енергій системи називається повною механічною енергією:

$$E = E_k + E_n. \quad (5.121)$$

Якщо в системі діють лише консервативні сили (сили тяжіння, пружності) та відсутнє тертя, виконується закон збереження механічної енергії: повна механічна енергія замкненої системи тіл залишається незмінною:

$$E_{k1} + E_{n1} = E_{k2} + E_{n2}. \quad (5.122)$$

Це один із найважливіших законів природи. Він показує, що енергія не виникає з нічого і не зникає безслідно, вона лише переходить з одного виду в інший. Наприклад, при падінні каменя його потенціальна енергія зменшується, перетворюючись на кінетичну, але їх сума в будь-якій точці траєкторії (за відсутності опору повітря) є сталою.

Однак у реальних системах завжди присутні сили тертя та опору середовища (дисипативні сили). Робота цих сил від’ємна, і вона призводить до зменшення повної механічної енергії системи. У такому випадку енергія «втрачається» для механіки, але насправді вона переходить у внутрішню енергію тіл (нагрівання). Це описується загальним законом збереження енергії, який враховує не лише механічні, а й теплові, електромагнітні, хімічні й інші процеси.

Ефективність будь-якого механізму або машини характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД). Оскільки через тертя частина енергії завжди перетворюється на тепло, корисна робота ($A_{\text{кор}}$) завжди буде меншою за повну (витрачену) роботу ($A_{\text{пов}}$). ККД (η) визначається як:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{пов}}} \cdot 100\%. \quad (5.123)$$

Зауважимо, що ККД реальних пристроїв завжди менший за 100%.

5.9 Гідростатика

Гідростатика – це розділ механіки рідин, який вивчає рівновагу рідин, які перебувають у стані спокою, а також дію нерухомих рідин на занурені в них тіла або стінки посудин. На відміну від твердих тіл, рідини мають унікальну властивість – текучість, що зумовлює їх здатність легко змінювати форму під дією навіть незначних зовнішніх сил, при цьому зберігаючи свій об’єм.

Основним поняттям у гідростатиці є гідростатичний тиск. Розглянемо нерухому рідину, на яку діє сила тяжіння. Якщо ми уявно виділимо певну площадку всередині цієї рідини, то на неї діятиме сила, спрямована перпендикулярно до її поверхні. Відношення цієї сили (F) до площі поверхні (S) називають тиском:

$$P = \frac{F}{S}. \quad (5.124)$$

У системі SI тиск вимірюється в паскалях (Па), де $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Важливою особливістю рідини є те, що тиск у ній поширюється в усіх напрямках однаково. Це твердження відоме як закон Паскаля (рис. 5.18): тиск, що діє на рідину або газ, передається без змін у кожному точку об’єму рідини та на стінки посудини. Цей принцип покладено в основу роботи гідравлічних машин. У гідравлічному пресі дві сполучені посудини різного діаметра заповнені рідиною і закриті поршнями.

Якщо до малого поршня площею S_1 прикласти силу F_1 , то створений тиск

$P=F_1/S_1$ передається на великий поршень площею S_2 , створюючи силу $F_2=P \cdot S_2$. Таким чином, ми отримуємо збільшення сили, яке буде пропорційним до відношення площ поршнів:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (5.125)$$

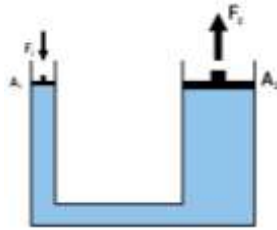


Рисунок 5.18 – Візуалізація закону Паскаля

Окрім зовнішнього тиску, у рідині завжди існує власний тиск, зумовлений її вагою, який називають гідростатичним тиском. Розглянемо стовп рідини висотою h із густиною ρ . Сила, з якою цей стовп тисне на дно, дорівнює його вазі:

$$G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g. \quad (5.126)$$

Оскільки об'єм циліндричного стовпа $V=S \cdot h$, то тиск на дно буде визначатись за наступним виразом:

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (5.127)$$

З цієї формули видно, що гідростатичний тиск залежить лише від густини рідини та глибини занурення і не залежить від форми посудини. Це призводить до явища, відомого як гідростатичний парадокс: сила тиску на дно посудини може бути більшою або меншою за вагу рідини в цій посудині, залежно від її форми, проте тиск на однаковій глибині завжди буде ідентичним.

Особливий випадок рівноваги спостерігається у сполучених посудинах – це посудини, які з'єднано між собою в нижній частині. Згідно з основним рівнянням гідростатики, у сполучених посудинах будь-якої форми вільні поверхні однорідної рідини встановлюються на одному рівні. Якщо ж у посудини налити рідини з різними густинами ρ_1 та ρ_2 , які не змішуються, то висоти їх стовпів над рівнем розподілу будуть обернено пропорційні їхнім густинам:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (5.128)$$

Цей принцип використовується у водомірному склі парових котлів, шлюзах та системі водопроводу.

Коли тіло занурюється у рідину, на нього починає діяти виштовхувальна сила. Це явище вперше описав давньогрецький учений Архімед. Закон Архімеда стверджує: на тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини в об'ємі зануреної частини тіла. Математично це записується як:

$$F_A = \rho_p \cdot g \cdot V_t, \quad (5.129)$$

де ρ_p – густина рідини;

V_t – об'єм зануреної частини тіла.

Сила Архімеда (рис. 5.19) завжди спрямована вертикально вгору і прикладена до центру мас витісненого об'єму рідини (центр плавучості).

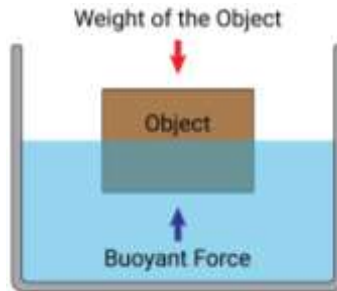


Рисунок 5.19 – Візуалізація закону Архімеда

Поведінка тіла в рідині залежить від співвідношення між силою тяжіння (F_g) та силою Архімеда (F_A). Якщо $F_g > F_A$ (густина тіла більша за густину рідини), то тіло тоне. Якщо $F_g = F_A$, то тіло плаває всередині рідини або на її поверхні. Якщо $F_g < F_A$, то тіло спливає до тих пір, поки вага витісненої ним води не зрівняється з його власною вагою.

Для забезпечення стійкості плавучого об'єкту важливо враховувати взаємне розташування центра ваги та центра плавучості. Стійкість – це здатність тіла повертатися в стан рівноваги після припинення дії зовнішніх сил, які викликали нахил (крен). Під час нахилу такого об'єкту центр плавучості зміщується,

створюючи пару сил, які намагаються повернути судно у вертикальне положення. Точка перетину вертикальної лінії дії виштовхувальної сили із віссю симетрії плавучого об'єкту називається метацентром. Для стабільного плавання метацентр повинен знаходитися вище центра ваги тіла об'єкта.

У практичних розрахунках часто враховують й атмосферний тиск, який діє на вільну поверхню рідини. Тоді повний тиск на глибині h буде рівний:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot h. \quad (5.130)$$

Атмосферний тиск зазвичай вимірюється барометрами, а різниця між абсолютним і атмосферним тиском – манометрами.

Варто пам'ятати, що хоча рідини вважають нестисливими в більшості випадків, під час надвисоких тисків їх густина може дещо змінюватися. Проте для класичних інженерних розрахунків закони Паскаля та Архімеда залишається надійним інструментом, який дозволяє описувати поведінку рідин у природі та техніці.

5.10 Гідродинаміка

Гідродинаміка – це розділ механіки суцільних середовищ, який вивчає рух рідин і газів, а також їх взаємодію з твердими тілами, які обтікаються ними. Під час вивчення реальних рідин дослідники зіштовхуються із великою кількістю складних чинників, таких як стисливість, внутрішнє тертя (в'язкість) та температурні зміни. Тому для спрощення опису доцільно ввести поняття ідеальної рідини – абсолютно нестисливої рідини, у якій відсутнє внутрішнє тертя між шарами.

Рух рідини описують за допомогою поля швидкостей, де кожній точці простору в певний момент часу відповідає вектор швидкості v . Якщо параметри руху (швидкість, тиск) у кожній точці простору не змінюються з часом, такий рух називають стаціонарним або усталеним. Для візуалізації руху використовують лінії течії – криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора швидкості. Сукупність ліній течії, які проходять через замкнений контур, утворюють трубу течії.

Одним із фундаментальних законів гідродинаміки є закон неперервності течії. Розглянемо трубу течії із двома довільними перерізами S_1 та S_2 . Оскільки рідина нестислива і в системі немає джерел або стоків, маса рідини, що проходить через будь-який перетин за одиницю часу, залишається сталою. Математично це виражається як добуток швидкості течії v на площу поперечного перетину S :

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = \text{const.} \quad (5.131)$$

Це означає, що у вузьких частинах труби рідина тече швидше, а в широкіх – повільніше (рис. 5.20).

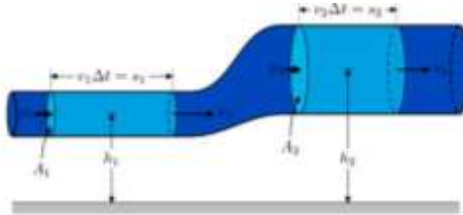


Рисунок 5.20 – Візуалізація закону Бернуллі

Основним законом динаміки ідеальної нестисливої рідини є рівняння Бернуллі, яке випливає із закону збереження енергії. Для стаціонарного потоку повна енергія одиниці об'єму рідини залишається незмінною вздовж лінії течії. Математичне подання рівняння матиме наступний вигляд:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{const.} \quad (5.132)$$

де p – статичний тиск (тиск, з яким рідина діє на стінки трубопроводу);

$\rho \cdot g \cdot h$ – гідростатичний тиск (зумовлений вагою стовпа рідини на висоті h);

$(\rho \cdot v^2)/2$ – динамічний тиск (пов'язаний із швидкістю руху рідини).

Якщо розглянути горизонтальну трубу течії ($h_1 = h_2$), рівняння спрощується до $p + (\rho \cdot v^2)/2 = \text{const.}$

Для вимірювання швидкості потоку, зазвичай, використовують трубку Піто або манометр Вентурі, принцип дії яких базується саме на різниці тисків у різних частинах потоку.

Слід враховувати і те, що реальні рідини завжди володіють в'язкістю (внутрішнім тертям). В'язкість виникає через молекулярну взаємодію між шарами рідини, які рухаються з різними швидкостями. Сила внутрішнього тертя F визначається законом Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (5.133)$$

де η – динамічна в'язкість;

S – площа взаємодіючих шарів;

dv/dx – градієнт швидкості (зміна швидкості в напрямку, перпендикулярному до течії).

Рух в'язкої рідини може бути двох типів: ламінарний та турбулентний (рис. 5.21). Під час ламінарного руху шари рідини ковзають паралельно один одному, не змішуючись. Якщо ж швидкість течії зростає понад певне критичне значення, рух стає турбулентним – утворюються вихори, і частинки рідини рухаються хаотично.



Рисунок 5.21 – Рух рідини в потоці
а) – ламінарний ($Re < 1$); б) – турбулентний ($Re > 1000$)

Характер течії визначається безрозмірним числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta}, \quad (5.134)$$

де D – характерний розмір трубопроводу.

Слід пам'ятати, що для малих значень числа Re переважає ламінарний режим, за великих – турбулентний.

Для в'язкої рідини, яка протікає по трубопроводі R та довжиною L , об'ємна витрата рідини Q визначається законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L}. \quad (5.135)$$

Це вказує на те, що пропускна здатність трубопроводів критично залежить від їх радіуса (зміна радіуса у 2 рази призводить до зміни витрати у 16 разів).

Окремої уваги заслуговує рух тіл у рідині. Під час повільного руху кульки радіусом r у в'язкому середовищі на неї діє сила опору, яка описується законом Стокса:

$$F_{\text{оп}} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (5.136)$$

Коли тіло падає у рідину, воно спочатку прискорюється, але зі зростанням швидкості зростає і сила опору. Згодом встановлюється рівновага між силою тяжіння, силою Архімеда та силою Стокса, і тіло починає рухатися рівномірно із своєю граничною швидкістю.

Рекомендована література: [1; 6; 9; 10; 11; 12; 16; 17].

Запитання для самоконтролю

1. Від яких фізичних величин залежить власний гідростатичний тиск рідини на дно посудини, і чому форма самої посудини не впливає на цей тиск?
2. За яких кінематичних умов руху опори або підвісу вага тіла може стати рівною нулю, і як цей стан впливає на дію сили тяжіння на об'єкт?
3. За яких специфічних умов закон збереження імпульсу може виконуватися для незамкнених систем або вздовж окремих координатних осей?
4. За яких умов механічна робота сили, що діє на тіло, буде дорівнювати нулю або мати від'ємне значення?
5. Поясніть яким чином відбувається передача тиску в усіх напрямках і залежність сили від площі поршнів.
6. У чому полягає фізичний зміст класичного закону додавання швидкостей? За яких умов він залишається справедливим для опису руху тіл?
7. У чому полягає фізичний зміст поняття «ідеальна рідина» та чому на практиці використовують цю модель замість опису реальних рідин?
8. У чому полягає фізичний зміст поняття інертності тіла? Які основні властивості має величина, яка є її кількісною мірою в класичній механіці?
9. У чому полягає фізичний зміст поняття миттєвої осі при плоскому русі та як вона дозволяє спростити математичний опис складного переміщення тіла?
10. У чому полягає фізичний зміст тангенціальної та нормальної складових повного прискорення при природному способі опису руху та як вони характеризують зміну швидкості за модулем і напрямом відповідно?
11. У чому полягає фізичний зміст теореми про кінетичну енергію та як вона пов'язує роботу сили із зупинкою рухомого тіла?
12. Чому в реальних механічних системах закон збереження повної механічної енергії не виконується в чистому вигляді та на що витрачається «втрачена» енергія?
13. Чому закон збереження імпульсу вважається універсальним і фундаментальнішим за закони Ньютона, на основі яких він був спочатку виведений у класичній механіці?

14. Чому перетворення Галілея вважають обмеженими? За яких швидкостей руху об'єктів вони стають непридатними для точних розрахунків?

15. Чому під час опису обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі доцільніше використовувати кутову швидкість як загальну характеристику, аніж лінійні швидкості окремих точок тіла?

16. Чому сила пружності та сили тертя, попри їх різну механічну дію, мають спільну електромагнітну природу на мікроскопічному рівні?

17. Як змінюється швидкість та тиск нестисливої рідини під час переходу із широкої частини горизонтальної труби у вузьку, і якими законами описується цей взаємозв'язок?

18. Яка головна кінематична особливість поступального руху дозволяє описувати його за допомогою методів кінематики матеріальної точки?

19. Яка головна умова рівноваги тіла на поверхні рідини згідно закону Архімеда, і як при цьому мають співвідноситись густина тіла та густина рідини?

20. Яка основна особливість сил інерції відрізняє їх від «звичайних» сил, які діють в інерційних системах відліку, і як ця особливість впливає на виконання третього закону Ньютона?

21. Яке припущення покладено в основу перетворень Галілея і як воно впливає на вигляд виразів для координат і швидкостей?

22. Яким чином введення сили інерції дозволяє використовувати основне рівняння динаміки для опису руху тіл у неінерційних системах відліку, які рухаються поступально?

23. Яким чином за заданим законом руху в координатній формі визначаються проекції, модуль та напрям векторів миттєвої швидкості та прискорення точки у декартовій системі координат?

24. Яким чином закон всесвітнього тяжіння Ньютона пояснює подвійну фізичну природу маси як міри інертності та міри гравітаційної взаємодії одночасно?

25. Яким чином третій закон Ньютона обґрунтовує твердження про те, що внутрішні сили системи не здатні змінити її сумарний імпульс?

26. Яким чином третій закон Ньютона пояснює природу взаємодії між тілами та які особливості мають сили, які при цьому виникають?

27. Які додаткові види прискорень, окрім поступального, необхідно враховувати під час складання загального рівняння руху тіла в довільній неінерційній системі відліку?

28. Які системи відліку називають інерційними та чому на практиці систему відліку, пов'язану із Землею, можна вважати такою лише наближено?

29. Які фізичні характеристики руху визначають за допомогою радіуса-

вектора у векторному способі опису? У чому полягає математична різниця між шляхом і модулем переміщення для довільного інтервалу часу?

30. Які чинники визначають перехід від ламінарного до турбулентного режиму руху рідини і як число Рейнольдса допомагає спрогнозувати цей характер течії?

ТЕМА 6. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ОХОРОНИ ТА БЕЗПЕКИ: ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, ОПТИКА, ХВИЛІ, АКУСТИКА

- 6.1 Електричне поле.
- 6.2 Електростатична індукція.
- 6.3 П'єзоелектричний ефект.
- 6.4 Електричний струм.
- 6.5 Закон Ома.
- 6.6 Закон Джоуля-Ленца.
- 6.7 Внутрішній фотоефект.
- 6.8 Магнітне поле.
- 6.9 Сила Лоренца.
- 6.10 Ефект Холла.
- 6.11 Закон Ампера.
- 6.12 Електромагнітна індукція.
- 6.13 Інтерференція та поляризація світла.
- 6.14 Характеристика та енергія пружних хвиль.
- 6.15 Електромагнітні хвилі.
- 6.16 Основні характеристики звуку.

Сфера охорони та безпеки тісно пов'язана із досягненнями сучасної науки і техніки. Ефективність, надійність та інтелектуальність сучасних систем забезпечення безпеки – від систем відеоспостереження та контролю доступу до складних комплексів виявлення загроз – безпосередньо залежать від глибокого розуміння фізичних принципів, які покладено основу їх роботи. Цей розділ базується на фундаментальних фізичних явищах та законах чотирьох ключових галузях фізики: електромагнетизм, оптика, хвилі та акустика.

Електромагнетизм є основою для роботи багатьох давачів, пристроїв радіозв'язку, індуктивних зчитувачів та систем магнітного контролю доступу. Розуміння електричних та магнітних полів, принципів роботи індукції та електроніки критично важливе для обслуговування та проектування охоронного обладнання.

Оптика є базисом для систем відеоспостереження (CCTV), тепловізійних камер, лазерних далекомірів та інфрачервоних бар'єрів.

Вивчення загальної теорії хвиль та їх характеристик необхідне для розуміння роботи радарів (радіохвиль), ультразвукових давачів (механічні хвилі), а також для аналізу перешкож та захисту інформації.

Акустика, як наука про звукові хвилі, охоплює принципи роботи систем звукового сповіщення, мікрофонів для аудіомоніторингу, а також спеціалізованих акустичних давачів, які реагують на шум чи вібрацію.

6.1 Електричне поле

Світ, який оточує нас навколо, тримається разом завдяки взаємодії заряджених частинок. Коли ми торкаємося металевої ручки після прогулянки по килиму або спостерігаємо за грозою, ми маємо справу з проявами електричного поля. У відповідності до концепції близькодії, взаємодія між зарядами не відбувається миттєво. Кожна заряджена частинка змінює властивості навколишнього середовища, створюючи в ньому особливий вид матерії – електричне поле. Основна особливість цього поля полягає в тому, що воно діє на інші заряджені тіла з певною силою. Це поле є невидимим для людського ока, проте воно цілком реальне, має енергію та поширюється у просторі із швидкістю світла.

Для кількісного опису електричного поля в кожній його точці вводять силову характеристику – напруженість. Напруженість електричного поля \vec{E} – це векторна фізична величина, яка дорівнює відношенню сили \vec{F} , з якою поле діє на точковий заряд q , до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (6.1)$$

Одиницею вимірювання напруженості у системі SI, є В/м або Н/Кл. Напрямок вектора напруженості збігається із напрямком сили, яка діє на позитивний заряд. Якщо поле створене одиночним точковим зарядом q , то модуль напруженості на відстані r від нього визначається за цим виразом:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}, \quad (6.2)$$

де $k \approx 9 \cdot 10^9$ (Н·м²)/Кл² – коефіцієнт пропорційності.

На рисунку 6.1 подано концепцію електричних полів навколо двох типів

точкових зарядів. Для того щоб візуалізувати таке невидиме поле, англійським фізиком М. Фарадейом було запропоновано використовувати лінії напруженості (силові лінії). Це умовні лінії, дотичні до яких, у кожній точці, збігаються із вектором напруженості. Важливо пам'ятати, що вони завжди починаються на позитивних зарядах й закінчуються на негативних або генеруються у нескінченність. Густота цих ліній вказує на величину поля: там, де лінії розташовані щільніше, поле сильніше.

У тому випадку, коли напруженість у всіх точках простору однакова за модулем і напрямком, поле називають однорідним. Прикладом такого поля є простір між двома паралельними металевими пластинами (рис. 6.2), які заряджені різнойменними зарядами.

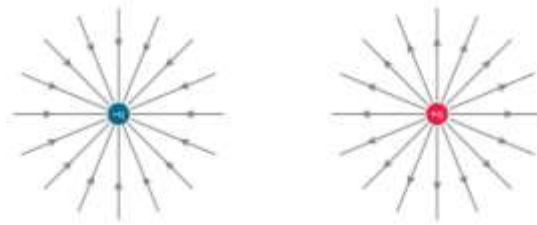


Рисунок 6.1 – Формування силових ліній навколо точкових зарядів

У тому випадку коли в електричному полі перебуває декілька зарядів, їх поля накладаються одне на одне. Тут вступає в дію принцип суперпозиції: напруженість електричного поля системи зарядів, в конкретній точці простору, дорівнює векторній сумі напруженостей полів, яка формується кожним зарядом окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (6.3)$$

Це дозволяє розраховувати складну структуру полів, знаючи властивості елементарних зарядів. Окрім силової характеристики, для електричного поля притаманна й енергетична сторона. Переміщуючи заряд, електричне поле виконує роботу. Ця робота не залежить від форми траєкторії, а лише від початкового та кінцевого положення заряду, що робить електростатичне поле потенціальним. Енергетичною характеристикою цього поля є потенціал φ – скалярна величина, яка визначається із співвідношення потенціальної енергії заряду в конкретній точці до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \quad (6.4)$$

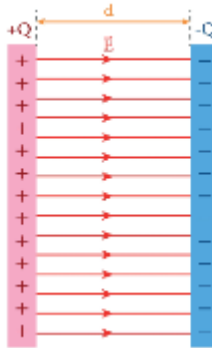


Рисунок 6.2 – Формування електричного поля між двома пластинами

Різницю потенціалів між двома точками прийнято називати напругою (U). Саме різниця потенціалів змушує вільні електрони рухатися, створюючи, при цьому, електричний струм.

6.2 Електростатична індукція

Електростатична індукція – це фундаментальне явище в електродинаміці, яке полягає у перерозподілі електричних зарядів у провіднику під впливом зовнішнього електричного поля. Щоб зрозуміти природу цього процесу, необхідно пам'ятати, що у металевих провідниках завжди наявна велика кількість вільних електронів, які здатні переміщуватися за усім об'ємом тіла. Коли ми вносимо незаряджений провідник у зовнішнє електростатичне поле напруженістю \vec{E}_0 , на кожен вільний електрон починає діяти електрична сила:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}_0, \quad (6.5)$$

де q – заряд електрона.

Оскільки електрони мають від'ємний заряд, вони починають рухатися у напрямку, який є протилежним до вектора напруженості поля. Це призводить до того, що на одній стороні провідника накопичується надлишок електронів (виникає негативний заряд), а на протилежній – їх дефіцит (виникає позитивний заряд). Ці заряди називаються індукованими, або наведеними.

Процес перерозподілу зарядів триває нескінченно короткий час і припиняється тоді, коли власне електричне поле індукованих зарядів \vec{E}' всередині провідника повністю компенсує зовнішнє поле. За принципом суперпозиції, сумарна напруженість поля всередині провідника стає рівною нулю:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0. \quad (6.6)$$

Це ключова властивість електростатичної індукції: всередині провідника, який перебуває в електростатичному полі, поле відсутнє. З цього випливає декілька важливих наслідків. По-перше, весь статичний заряд провідника зосереджується виключно на його зовнішній поверхні. По-друге, потенціал в усіх точках провідника (і на його поверхні, і всередині) є однаковим, тобто провідник є екіпотенціальним тілом. Напруженість поля біля поверхні провідника завжди спрямована за нормаллю до нього, в іншому випадку виник би тангенціальний рух зарядів, що суперечило б умові рівноваги.

Математично, зв'язок між поверхневою густиною заряду σ та напруженістю поля поблизу поверхні провідника описується наступним виразом:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad (6.7)$$

де ϵ_0 – електрична стала.

Цікаво, що індуквані заряди розподіляються за поверхні нерівномірно: найбільша їх концентрація спостерігається на виступах та гострих частинах провідника.

Явище електростатичної індукції широко використовується в техніці, зокрема для створення електростатичного захисту (клітка Фарадея – зовнішні індуквані заряди наводяться на поверхні корпусу, їх поле нейтралізує зовнішнє поле в його середині).

Важливо розрізнити індукцію в провідниках та поляризацію в діелектриках. У діелектриках немає вільних носіїв, тому там відбувається лише незначне зміщення зв'язаних зарядів у межах молекул.

6.3 П'єзоелектричний ефект

П'єзоелектричний ефект є одним із найбільш затребуваних фізичних явищ у сучасній техніці, яке забезпечує зв'язок між механічними процесами та електричною енергією. Сама назва походить від грецького слова «piezo», що означає «тисну». Це явище було відкрито у 1880 році братами Жаком та П'єром Кюрі, які помітили, що під час стиснення певних кристалів на їх гранях виникають електричні заряди.

В основу цього явища було покладено особливість кристалічної структури певних діелектриків. Для виникнення п'єзо ефекту кристал повинен не мати

центру симетрії. На практиці розрізняють два типи ефекту: прямий та зворотний. Прямий п'єзоелектричний ефект полягає у виникненні електричної поляризації під дією механічних напружень. Якщо ми візьмемо пластинку з кварцу і почнемо її стискати або розтягувати, на протилежних сторонах з'являться заряди протилежних знаків. Величина сформованого заряду q буде прямо пропорційним механічній силі F :

$$q = \frac{d}{F}, \quad (6.8)$$

де d – константа (п'єзоелектричний модуль), яка характеризує конкретний матеріал.

Зворотний п'єзоелектричний ефект, відкритий Г. Ліппманом і підтверджений Кюрі, працює навпаки: якщо до кристала прикласти електричне поле, він почне деформуватися (змінювати свої лінійні розміри). Цікаво, що ці процеси є лінійними та зворотними.

У стані спокою позитивні та негативні центри зарядів у решітці кристала збігаються, тому матеріал електрично нейтральний. Однак під час механічної деформації структура зміщується так, що центри тяжіння зарядів розходяться, утворюючи електричний диполь. Сумарний ефект мільярдів таких зміщень призводить до появи вимірюваної різниці потенціалів на поверхні матеріалу.

Найвідомішим природним п'єзоелектриком є кварц (SiO_2). Проте сьогодні, в промисловості, найчастіше використовують сегнетокераміку, таку як цирконат-титанат свинцю, оскільки штучні матеріали володіють значно вищими п'єзомодулями.

6.4 Електричний струм

Ми живемо в епоху, де електрика є фундаментом цивілізації. У широкому розумінні, електричний струм – це упорядкований (спрямований) рух заряджених частинок. У металах такими частинками є вільні електрони, в електролітах – позитивні та негативні іони, а в газах – іони та електрони. Для того, щоб у провіднику виник струм, необхідно виконання двох ключових умов: наявність вільних носіїв заряду та наявність зовнішнього електричного поля, яке змусить ці частинки рухатися в певному напрямку (це поле створюється джерелами струму). За напрямок струму в колі прийнято вважати напрямок руху позитивно заряджених частинок, тобто від «плюса» до «мінуса» джерела.

Головною кількісною характеристикою є сила струму (I). Вона визначає, який електричний заряд (q) проходить через поперечний перетин провідника за

одиницю часу (t):

$$I = \frac{q}{t}. \quad (6.9)$$

Одиницею вимірювання сили струму в системі SI є ампер (А).

Якщо сила струму та його напрямок не змінюються з часом, такий струм називають постійним. Проте сам по собі рух частинок неможливий без енергетичного впливу. Тут доцільно ввести поняття електричної напруги (U), яка характеризує роботу електричного поля (А) із переміщення одиничного заряду (q):

$$U = \frac{A}{q}. \quad (6.10)$$

Напругу прийнято вимірювати у вольтах (В).

Важливо розуміти, що провідник чинить опір руху зарядів. Це явище називається електричним опором (R). Він виникає через взаємодію вільних електронів з іонами кристалічної ґратки металу. Опір вимірюється в омах (Ом) і залежить від матеріалу, довжини провідника (l) та площі його перерізу (S):

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (6.11)$$

де ρ – питомий опір матеріалу.

Зв'язок між цими трьома величинами описує фундаментальний Закон Ома для ділянки кола: сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна її опору:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (6.12)$$

Коли електричний струм проходить крізь провідник, він виконує роботу, яка, зазвичай, перетворюється на теплову енергію. Це описує закон Джоуля-Ленца: кількість теплоти (Q), яка виділяється провідником зі струмом, пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму:

$$Q = I^2 R t. \quad (6.13)$$

Окрім теплової, струм може чинити й магнітну дію (рис. 6.3), хімічну та світлову.

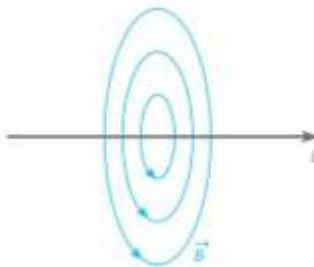


Рисунок 6.3 – Електромагнітна індукція

6.5 Закон Ома

Одним із фундаментальних законів електродинаміки, який встановлює зв'язок між основними характеристиками електричного кола є закон Ома.

Для того щоб зрозуміти фізичну суть цього закону, необхідно згадати про три ключові складові: силу струму, напругу та електричний опір. Електричний струм – це впорядкований рух заряджених частинок, а його інтенсивність вимірюють за допомогою сили струму I , яка визначається кількістю заряду, який проходить через поперечний перетин провідника за одиницю часу. Проте цей рух не виникає сам по собі; для його підтримки необхідна електрична енергія, яку характеризує напруга U . І нарешті, будь-яке середовище, у якому рухаються заряди, чинить їм певну протидію, яку називають електричним опором R .

У 1826 році німецький фізик Г. С. Ом під час серії експериментів встановив пряму залежність між цими величинами. Він помітив, що якщо збільшувати напругу на ділянці кола, сила струму в ній зростає пропорційно. Математично це твердження, відоме як закон Ома для ділянки кола, записується у вигляді (6.12). З цього рівняння випливає, що сила струму прямо пропорційна напрузі на кінцях ділянки провідника і обернено пропорційна його опору. Це означає, що за незмінного опору подвоєння напруги призведе до подвоєння сили струму. Водночас, якщо ми збільшимо опір провідника (наприклад, замінивши його на довший або виготовлений з іншого матеріалу), сила струму при тій же напрузі зменшиться. Опір провідника залежить від його геометричних розмірів, матеріалу та температури. Для однорідного циліндричного провідника опір обчислюється за (6.11).

Важливо розуміти, що закон Ома у вищезгаданому вигляді справедливий лише для ділянки кола, яка не містить джерел струму. Проте, до реального

повного кола завжди включають джерело електричної енергії, яке володіє власною характеристикою – електрорушійну силу (ЕРС), яку позначають літерою ε . Окрім зовнішнього опору споживачів R , джерелу притаманний й внутрішній опір r . Тоді закон Ома для повного кола набуває такого вигляду:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (6.14)$$

Цей вираз вказує на те, що загальний опір кола складається із зовнішнього та внутрішнього опорів, а сила струму залежить від повної енергії, яку надає джерело. З цього закону випливає цікаве явище – режим короткого замикання. Якщо зовнішній опір R стає близьким до нуля, сила струму в колі різко зростає і обмежена лише малим внутрішнім опором джерела, що може призвести до перегріву та пожежі.

Графічну залежність сили струму від напруги називають вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Для металевих провідників за сталої температури цей графік має вигляд прямої лінії (рис. 6.4), яка проходить через початок координат. Кут нахилу цієї прямої до осі напруги залежить від опору провідника: чим крутіше підіймається графік, тим меншим є опір.

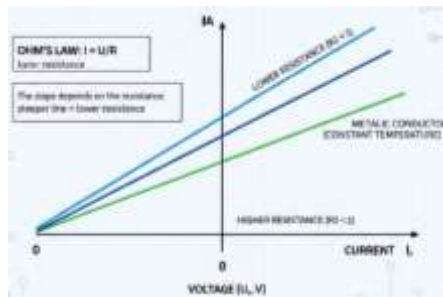


Рисунок 6.4 – Вольт-амперна характеристика

На практиці закон Ома є незамінним інструментом для розрахунку параметрів електричних мереж. Він дозволяє визначити, який опір повинен мати прилад для безпечної роботи за певної напруги, або яку напругу необхідно подати, щоб отримати необхідний струм.

6.6 Закон Джоуля-Ленца

Під час проходження електричного струму через провідник спостерігається цікаве фізичне явище: провідник нагрівається. Це відбувається тому, що вільні

електрони, рухаючись під дією електричного поля, постійно зіштовхуються із іонами кристалічної ґратки металу або молекулами середовища. Під час таких зіткнень кінетична енергія електронів частково передається частинкам провідника, що призводить до збільшення їх внутрішньої енергії, а отже – до підвищення температури. Електрична енергія фактично перетворюється на теплову.

Кількісну характеристику цього процесу незалежно один від одного встановили два видатних вчених: англієць Д. Джоуль та Е. Ленц у середині XIX століття. Сформульований ними закон базується на тому, що кількість теплоти, яка виділяється провідником із струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму.

Математично цей закон описується (6.13). Слід зауважити, що цей вираз є універсальним і застосовується для будь-яких ділянок кола, де відбувається лише теплова дія струму. Якщо ж ми використовуємо закон Ома для ділянки кола ($I=U/R$), то формулу Джоуля-Ленца необхідно перетворити, для зручності розрахунків, через напругу:

$$Q = \frac{U^2}{R} \cdot t \text{ або } Q = U \cdot I \cdot t. \quad (6.15)$$

Проте важливо пам'ятати, що ці похідні формули коректні лише тоді, коли уся електрична енергія витрачається виключно на нагрівання (без виконання механічної роботи або хімічних перетворень).

На практиці закон Джоуля-Ленца має колосальне значення. Його покладено в основу роботи усіх електронагрівальних приладів. Основним елементом таких пристроїв є нагрівальний елемент – провідник із високим питомим опором (наприклад, ніхром), який здатний витримувати високі температури.

З іншого боку, теплова дія струму часто буває шкідливою. У лініях електропередач (ЛЕП) нагрівання дротів призводить до значних втрат енергії. Щоб мінімізувати ці втрати, за (6.13), необхідно або зменшувати опір дротів (що дорого, бо потребує збільшення їх товщини), або зменшувати силу струму. Саме тому для передачі енергії на великі відстані використовують трансформатори, які підвищують напругу до сотень тисяч вольт, що дозволяє пропорційно знизити силу струму і суттєво зменшити нагрівання ліній.

Також не можна забувати про безпеку. Якщо в електричному колі різко зростає сила струму (наприклад, при короткому замиканні, коли опір R стає мінімальним), кількість теплоти Q зростає в квадратичній залежності. Це призводить до розплавлення ізоляції та пожеж. Для запобігання таким ситуаціям використовують запобіжники. В основу плавких запобіжників покладено той же

ж закон Джоуля-Ленца: тонка нитка всередині запобіжника розрахована на певну силу струму, і під час її перевищення вона миттєво плавиться від перегріву, розриваючи електричне коло.

6.7 Внутрішній фотоефект

Явище фотоефекту є одним із ключових доказів квантової природи світла. На відміну від зовнішнього фотоефекту, де електрони під дією світла вилітають за межі речовини, внутрішній фотоефект характерний для напівпровідників та діелектриків. Його суть полягає у перерозподілі електронів за енергетичними станами всередині речовини під впливом електромагнітного випромінювання. Це призводить до зміни концентрації носіїв заряду, що безпосередньо впливає на електричні властивості матеріалу, зокрема на його провідність.

Щоб зрозуміти механізм цього явища, необхідно звернутися до зонної теорії твердих тіл. У напівпровідниках приладна зона (валентна) повністю заповнена електронами, а зона провідності зазвичай порожня. Між ними знаходиться заборонена зона енергією E_g . Коли фотон світла з енергією $h\nu$ взаємодіє з електроном валентної зони, він передає йому свою енергію. Якщо ця енергія достатня для подолання «енергетичного бар'єра» забороненої зони, електрон переходить у зону провідності.

Цей процес описується наступною умовою:

$$h\nu \geq E_g, \quad (6.16)$$

де h – стала Планка;
 ν – частота світла.

У результаті такого переходу в напівпровіднику з'являються, у зоні провідності, вільний електрон та «дірка» – у валентній зоні. Обидва ці утворення стають носіями електричного заряду. Це явище називають власною фотопровідністю. Важливою характеристикою тут виступає «червона межа» фотоефекту – максимальна довжина хвилі λ_{\max} , за якої ще можливе збудження електронів:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g}, \quad (6.17)$$

де c – швидкість світла.

Якщо довжина хвилі світла буде більшою за це значення, енергії фотона

буде замало для перекидання електрона, і речовина залишиться прозорою або не змінить своєї провідності.

Окрім власного фото ефекту, існує також домішковий внутрішній фото ефект. Він спостерігається у напівпровідниках, яким властиві сторонні домішки. У такому випадку електрон може переходити з домішкового рівня у зону провідності або із валентної зони на рівень домішки. Оскільки енергія активації домішок зазвичай значно менша за E_g , такий фото ефект може викликатися довгохвильовим (інфрачервоним) випромінюванням.

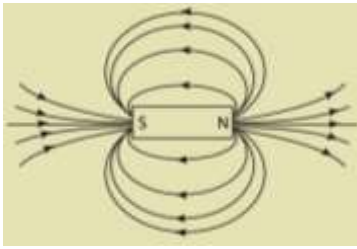
Одним із головних наслідків внутрішнього фото ефекту є фоторезистивний ефект – зменшення електричного опору матеріалу під час освітлення. Прилади, які працюють на цьому принципі, називають фоторезисторами. Вони не мають (p-n)-переходу і їх провідність змінюється пропорційно інтенсивності падаючого, на нього, світла. Проте внутрішній фото ефект може проявлятися і складніше, наприклад, у формі вентильного фото ефекту (фотогальванічного ефекту). Це відбувається у структурах з (p-n)-переходом, де під дією світла виникає ЕРС. Саме цей принцип покладено в основу роботи сонячних батарей, де світлова енергія напряму перетворюється на електричну без зовнішнього джерела живлення.

Кінетика внутрішнього фото ефекту є досить складною, оскільки процеси генерації носіїв заряду супроводжуються їх рекомбінацією (поверненням електронів у зв'язаний стан) та захопленням у «пастку» (дефекти кристалічної ґратки). Тому фотострум не зникає миттєво після вимкнення світла, що обумовлює певну інерційність приладів.

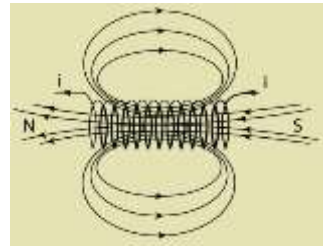
6.8 Магнітне поле

Магнітне поле – це особлива форма матерії, яка існує навколо рухомих електричних зарядів або провідників зі струмом та здійснює силовий вплив на інші рухомі заряди чи тіла з магнітним моментом. Важливо розуміти, що електричне та магнітне поля є компонентами єдиного електромагнітного поля. Якщо навколо нерухомого заряду існує лише електричне поле, то навколо рухомого – і електричне, і магнітне. Основною силовою характеристикою цього поля є вектор магнітної індукції \vec{B} (одиницею вимірювання індукції в системі SI є тесла (Тл)).

На відміну від ліній електричного поля, які починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, лінії магнітної індукції завжди замкнені (рис. 6.5). Це свідчить про те, що в природі не існує вільних магнітних зарядів (монополів).



а)



б)

Рисунок 6.5 – Магнітне поле

а) – магніт; б) – соленоїд

Для візуалізації поля використовують метод ліній магнітної індукції. Їх напрямок визначається за допомогою правила свердлика (рис. 6.6): якщо спрямувати великий палець правої руки за напрямком струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок ліній магнітної індукції.

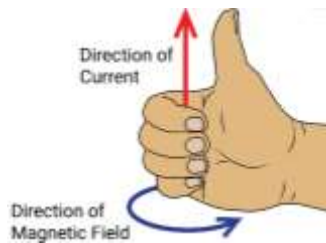


Рисунок 6.6 – Візуалізація правила свердлика

Для колового струму (соленоїда) правило працює навпаки: чотири пальці за струмом у витках, а великий палець вказує на північний полюс N.

Взаємодія поля з провідником, по якому протікає струм, описується законом Ампера. Сила Ампера F_A розраховується за виразом:

$$F_A = B \cdot I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha, \quad (6.18)$$

де Δl – довжина ділянки провідника;

α – кут між напрямком струму та вектором магнітної індукції.

Напрямок цієї сили визначають за правилом лівої руки: лінії індукції мають входити в долоню, чотири пальці спрямовані за струмом, тоді відкинутий на 90° великий палець покаже напрямок сили.

Якщо ж ми розглядаємо дію поля не на весь провідник, а на окрему заряджену частинку, яка рухається, то йдеться про силу Лоренца (F_L). Вона визначається як:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha, \quad (6.19)$$

де q – величина заряду;
 v – швидкість заряду.

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до вектора швидкості, тому вона не виконує роботи і не змінює модуль швидкості частинки, а лише відхиляє її, змушуючи рухатися за дугою або спіраллю. Важливою характеристикою магнітних властивостей речовини є магнітна проникність (μ). За цією ознакою речовини прийнято поділяти на діамантики (трохи ослаблюють поле), парамагнетики (трохи підсилюють) та феромагнетики (залізо, кобальт, нікель), які здатні посилювати зовнішнє поле в тисячі разів. Це явище використовують в електромагнітах та трансформаторах.

Явище електромагнітної індукції, відкрите М. Фарадеєм, замикає коло взаємозв'язку електрики та магнетизму: зміна магнітного потоку (Φ) через замкнений контур призводить до виникнення в ньому індукovanого електричного струму. Магнітний потік, як правило, визначають з:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha. \quad (6.20)$$

Згідно з правилом Ленца, індукований струм завжди має такий напрямок, щоб своїм власним магнітним полем протидіяти зміні того магнітного потоку, який його викликав.

6.9 Сила Лоренца

Вивчення електромагнітних явищ показує, що електричний струм – це не що інше, як впорядкований рух заряджених частинок. Оскільки магнітне поле діє на провідник із струмом (сила Ампера), логічно припустити, що ця дія є результатом сумарного впливу поля на кожен рухому частинку окремо. Силу, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, прийнято називати силою Лоренца.

Для визначення величини цієї сили скористаємося законом Ампера. Знаючи, що сила Ампера (6.18), а сила струму $I = q \cdot n \cdot v \cdot S$ (де n – концентрація часточок), ми можемо розділити загальну силу на декілька частин:

$$N = n \cdot I \cdot S. \quad (6.21)$$

В результаті отримаємо основну формулу сили Лоренца (6.19).

Важливо пам'ятати: якщо частинка нерухома ($v=0$) або рухається вздовж ліній поля ($\alpha=0^\circ$), магнітне поле на неї не діє. Максимальна сила досягається під час руху перпендикулярно до ліній індукції.

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом лівої руки (рис. 6.7), але з урахуванням знаку заряду.

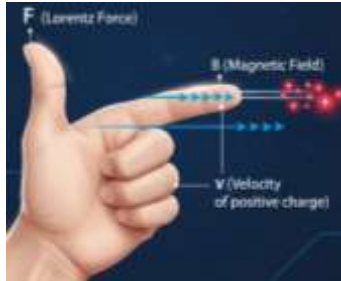


Рисунок 6.7 – Визначенні сили Лоренца (правило лівої руки)

Ліву руку необхідно розмістити так, щоб лінії магнітної індукції B входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок руху позитивно зарядженої частинки. Тоді відігнутий на 90° великий палець покаже напрямок сили F_L . Якщо частинка має негативний заряд (наприклад, електрон), сила буде спрямована у протилежний бік (або ж пальці слід спрямовувати проти руху електрона).

Однією з ключових особливостей сили Лоренца є те, що вона завжди перпендикулярна до вектора швидкості частинки. Згідно з законами механіки, сила, яка перпендикулярна до швидкості, не виконує роботи. Це означає, що магнітне поле не змінює кінетичну енергію та модуль швидкості частинки, воно лише змінює напрямок її руху.

Розглянемо рух частинки в однорідному магнітному полі. Якщо частинка влітає перпендикулярно до ліній індукції, сила Лоренца відіграє роль доцентрової сили:

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{R}. \quad (6.22)$$

Звідси можна виразити радіус траєкторії, по якій буде рухатися частинка: $R=(mv)/(qB)$. Таким чином, в однорідному полі заряджена частинка рухається по колу. Якщо ж швидкість спрямована під кутом до ліній поля, рух буде відбуватися по спіралі (гвинтовій лінії).

6.10 Ефект Холла

Одним із найбільш значущих явищ у фізиці твердого тіла є ефект Холла. Це явище було відкрите у 1879 році Е. Холлом та полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів у провіднику із струмом, за умови коли цей провідник розміщений в магнітному полі, яке буде перпендикулярним до напрямку проходження струму .

Щоб краще уявити цей ефект необхідно мати металеву пластину шириною d й товщиною h (рис. 6.8).

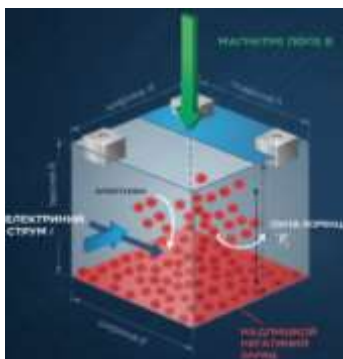


Рисунок 6.8 – Ефект Холла

Коли пропускати через неї електричний струм, носії заряду (у металах це електрони) рухаються впорядковано із швидкістю дрейфу v . Якщо прикласти зовнішнє магнітне поле з індукцією B , вектор якої перпендикулярний до площини пластини, на кожен рухомий заряд почне діяти сила Лоренца:

$$F_L = q(v \times B). \quad (6.23)$$

Оскільки електрони мають від’ємний заряд, сила Лоренца відхиляє їх до однієї з бічних граней пластини. В результаті на цій грані накопичується надлишковий негативний заряд, а на протилежній – позитивний (через нестачу електронів). Це розмежування зарядів створює внутрішнє поперечне електричне поле E_H , яке називають полем Холла. Процес накопичення зарядів триває доти, доки електрична сила, яка діє на електрони з боку поля Холла, не врівноважить магнітну частину сили Лоренца. Математично цей стан рівноваги виражається наступною рівністю:

$$e \cdot E_H = e \cdot v \cdot B. \quad (6.24)$$

Звідси поле Холла визначається як $E_H = vB$. Оскільки різниця потенціалів U_H пов'язана із напруженістю поля співвідношенням $U_H = E_H \cdot d$, можна отримати основний вираз для холлівської напруги:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{h}. \quad (6.25)$$

У цьому виразі коефіцієнт R_H називають сталою Холла, і вона є ключовою характеристикою матеріалу. Для металів сталу Холла визначають через концентрацію носіїв заряду n , як:

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e}. \quad (6.26)$$

Це відкриття стало справжнім проривом, адже воно дозволило експериментально визначити знак носіїв заряду у різних речовинах. До Е. Холла вважалося, що струм в усіх провідниках зумовлений рухом позитивних зарядів, але його ефект довів, що в більшості металів рухаються саме негативні електрони.

Варто зауважити, що в напівпровідниках картина стає цікавішою, оскільки там можуть бути два типи носіїв – електрони та «дірки». У напівпровідниках (n)-типу стала Холла від'ємна, а в (p)-типу – додатня.

За дуже низьких температур та у сильних магнітних полях спостерігається квантовий ефект Холла, де холлівський опір змінюється не плавно, а стрибкоподібно. Це явище настільки точне, що зараз воно використовується як міжнародний еталон електричного опору. Як бачимо, просте відхилення електронів у магнітному полі, виявлене понад сто років тому, сьогодні забезпечує роботу усієї сучасної цифрової цивілізації.

6.11 Закон Ампера

Взаємодія електричних струмів є однією із фундаментальних основ електродинаміки. Подібно до того, як нерухомі електричні заряди взаємодіють через електростатичне поле, провідники із струмом створюють навколо себе магнітне поле, яке діє на інші провідники. А.-М. Ампер у 1820 році експериментально встановив закон, який описує силу, яка діє на ділянку провідника із струмом у магнітному полі. Ця сила отримала назву сила Ампера.

Сила Ампера прямо пропорційна силі струму I , магнітній індукції B , довжині ділянки провідника Δl та синусу кута α між напрямком струму та вектором магнітної індукції. Математично закон записують (6.18).

З цього виразу випливає, що сила буде максимальною ($F_{\max}=B \cdot I \cdot l$), коли провідник розташовано перпендикулярно до ліній поля ($\alpha=90^\circ$), й дорівнюватиме нулю, якщо провідник розташовано паралельно до ліній поля ($\alpha=0^\circ$).

Для визначення напрямку сили Ампера використовують правило лівої руки (рис. 6.9): якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на 90 градусів великий палець покаже напрямок сили, що діє на провідник. Це правило демонструє, що сила Ампера завжди перпендикулярна і до напрямку струму, і до вектора магнітної індукції.



Рисунок 6.9 – Визначення напрямку сили Ампера

Важливим наслідком закону Ампера є взаємодія двох паралельних провідників із струмом. Якщо струми в провідниках течуть в одному напрямку, провідники притягуються; якщо в протилежних – відштовхуються. Це явище використовується в системі SI для визначення одиниці сили струму – Ампера. Один Ампер – це сила постійного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і надто малого поперечного перетину, які розташовано на відстані 1 метр один від одного у вакуумі, викликав би між цими провідниками силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр його довжини.

6.12 Електромагнітна індукція

Явище електромагнітної індукції, відкрите М. Фарадеєм у 1831 році, є одним із найважливіших фундаментальних законів природи. Суть цього явища

полягає у виникненні електричного струму в замкненому провідному контурі під час зміни магнітного потоку, який пронизує цей контур. Для розуміння цього процесу необхідно спочатку розглянути поняття магнітного потоку Φ . Магнітний потік – це фізична величина, яка визначається як добуток модуля вектора магнітної індукції B на площу поверхні S , яку він пронизує, та на косинус кута α між вектором індукції та нормаллю до поверхні.

Математичний опис подано в (6.20). Одиницею вимірювання потоку в системі SI є вебер (Вб).

Фарадей експериментально встановив, що електричний струм виникає лише тоді, коли магнітний потік змінюється в часі. При цьому не має значення, яким саме чином відбувається ця зміна: шляхом руху магніта відносно котушки, зміною сили струму у сусідньому провіднику або деформацією самого контуру в магнітному полі. Основним висновком є те, що за будь-якої зміни магнітного потоку через поверхню, яку обмежено контуром, у цьому контурі виникає ЕРС індукції. За законом електромагнітної індукції Фарадея, ЕРС індукції (ε_i) прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (6.27)$$

Знак «мінус» у цьому виразі відображає правило Ленца, яке визначає напрямок індукційного струму. Правило Ленца стверджує: індукційний струм у контурі завжди має такий напрямок, що створений ним магнітний потік намагається протидіяти зміні того магнітного потоку, який викликав цей струм. Це є проявом закону збереження енергії: для створення електричної енергії необхідно виконати роботу проти сил магнітної взаємодії. Якщо зовнішній магнітний потік зростає, то магнітне поле індукційного струму буде спрямоване проти нього; якщо ж потік зменшується – поле струму підтримуватиме його.

Важливим окремим випадком є явище самоіндукції. Це виникнення ЕРС індукції в самому провіднику, по якому протікає змінний струм, внаслідок зміни власного магнітного поля цього струму. Основною характеристикою провідника в цьому процесі є індуктивність L (вимірюється в генрі, Гн). Магнітний потік самоіндукції буде пропорційним силі струму: $\Phi=L \cdot I$. Тоді ЕРС самоіндукції визначається з наступного виразу:

$$\varepsilon_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (6.28)$$

Самоіндукція проявляється у тому, що струм у колі, яке містить котушку, не може миттєво зрости або зникнути (рис. 6.10). Саме завдяки самоіндукції

виникає іскра під час розмикання електричних кіл. Енергія магнітного поля котушки з індуктивністю L , по якій тече струм I , визначається з рівняння:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}. \quad (6.29)$$

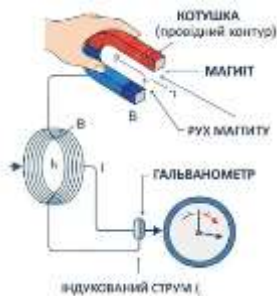


Рисунок 6.10 – Електромагнітна індукція

Варто зауважити, що розуміння електромагнітної індукції відкрило людству шлях до керування енергією, що стало фундаментом технічного прогресу.

6.13 Інтерференція та поляризація світла

Світло, як електромагнітна хвиля, проявляє низку властивостей, які неможливо пояснити в межах геометричної оптики. Найяскравішими прикладами хвильової природи світла є явища інтерференції та поляризації.

Інтерференція світла – це явище перерозподілу інтенсивності світла в просторі в результаті накладання двох або більше когерентних хвиль (рис. 6.11). У точках, де хвилі сходяться в однакових фазах, спостерігається максимум освітленості, а в протилежних – мінімум. Головною умовою виникнення стійкої інтерференційної картини є когерентність хвиль, що означає постійність їх різниці фаз у часі та однакову частоту. Оскільки звичайні джерела світла (лампи розжарювання, свічки) випромінюють світло окремими короткими імпульсами – цугами, які не є узгодженими між собою, для отримання когерентних променів використовують методи штучного поділу однієї хвилі на дві або більше. Класичним прикладом є дослід Юнга, де світло від одного джерела проходить крізь два вузьких отвори, які стають вторинними когерентними джерелами.

Результат накладання хвиль у певній точці залежить від оптичної різниці ходу Δ . Оптична довжина шляху L визначається як добуток геометричного

шляху s на показник заломлення середовища n :

$$L = n \cdot s. \quad (6.30)$$

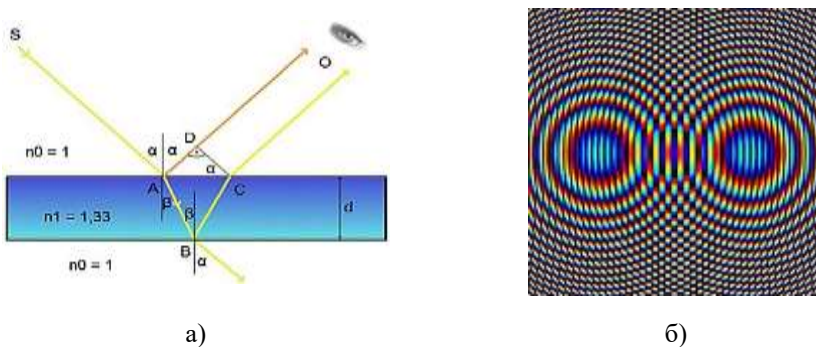


Рисунок 6.11 – Інтерференція світла
 а) – інтерференція світлових хвиль; б) – інтерференційне зображення

Тоді оптична різниця ходу між двома променями буде дорівнювати $\Delta = L_2 - L_1$. Умова максимуму інтерференції виконується, якщо на різниці ходу вкладається ціле число довжин хвиль: $\Delta = k \cdot \lambda$, де $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ є порядком максимуму. Умова мінімуму спостерігається, коли на різниці ходу вкладається непарна кількість півхвиль: $\Delta = (2k + 1) \cdot (\lambda/2)$.

Одним із практичних застосувань інтерференції є спостереження кольорів у тонких плівках (наприклад, мильні бульбашки або плями оливи на воді). Коли світло падає на тонку плівку, воно відбивається від її верхньої та нижньої поверхонь. Ці два відбиті промені є когерентними й інтерферують між собою. Різниця ходу в такому випадку залежить від товщини плівки d та кута падіння світла. Також широко відомими є й кільця Ньютонa (рис. 6.12) – інтерференційна картинка, яка виникає під час накладання плоскої скляної пластини та плоскоопуклої лінзи з великим радіусом кривизни. У точці дотику виникає темна пляма, навколо якої чергуються світлі та темні кільця.

Іншим фундаментальним явищем, що підтверджує поперечність світлових хвиль, є поляризація (рис. 6.13). У природному світлі вектори напруженості електричного поля E та магнітної індукції B коливаються в усіх можливих напрямках, перпендикулярних до променя. Світло, у якому напрямки коливань вектора E впорядковано певним чином, прийнято називати поляризованим. Якщо коливання відбуваються лише в одній площині, таке світло називають плоскополяризованим (або лінійно поляризованим).

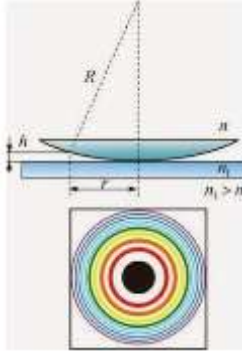


Рисунок 6.12 – Кільця Ньютона та їх формування

Поляризація може виникати під час відбивання та заломлення світла на межі двох діелектриків. Якщо промінь падає на поверхню під певним кутом (кут Брюстера – φ_B), то відбитий промінь стає повністю плоскополяризованим. Закон Брюстера записують наступним чином:

$$\varphi_B = n_{21} \quad (6.31)$$

де n_{21} – відносний показник заломлення другого середовища відносно першого.

При цьому заломлений промінь залишається частково поляризованим, а кут між відбитим й заломленим променями становить 90° .

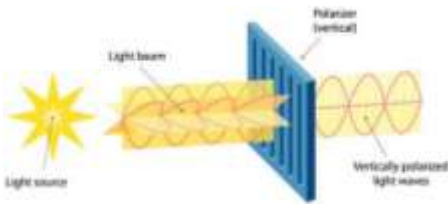
Для отримання поляризованого світла використовують спеціальні пристрої – поляризатори (наприклад, кристали турмаліну або призми Ніколя). Вони пропускають лише ті компоненти вектора E , які є паралельними до осі пропускання поляризатора. Якщо на шляху уже поляризованого світла поставити другий поляризатор, який називають аналізатором, інтенсивність світла на виході буде залежати від кута α між їх осями. Ця залежність описується законом Малюса:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (6.32)$$

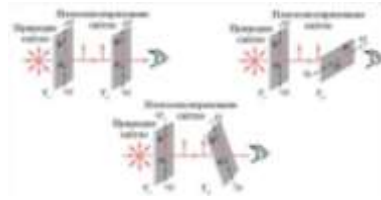
де I_0 – інтенсивність поляризованого світла, яка падає на аналізатор;

I – інтенсивність світла після аналізатора.

Якщо осі паралельні ($\alpha=0^\circ$), то інтенсивність максимальна; якщо вони перпендикулярні ($\alpha=90^\circ$), то світло через систему не проходить (спостерігається повне затемнення).



а)



б)

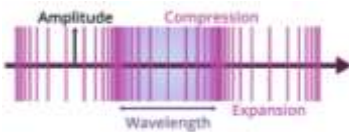
Рисунок 6.13 – Поляризація світла

а) – поляризація природного світла за допомогою поляризатора; б) – схеми поляризації хвилі

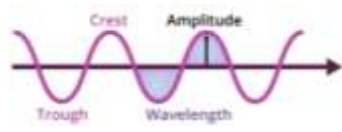
6.14 Характеристика та енергія пружних хвиль

Пружні хвилі – це процес поширення механічних збурень у пружному середовищі (твердому, рідкому або газоподібному). Головною особливістю цього процесу є те, що часточки середовища не переносяться разом із хвилею, а лише здійснюють коливання навколо своїх положень рівноваги. Переноситься лише стан деформації та енергія.

Залежно від напрямку коливань часточок відносно напрямку поширення самої хвилі, їх поділяють на поздовжні та поперечні (рис. 6.14). У поздовжніх хвилях часточки коливаються вздовж променя хвилі (це характерно для газів, рідин та твердих тіл), а у поперечних – у площині, яка є перпендикулярною до напрямку поширення (можливі лише у твердих тілах, що мають пружність зсуву).



а)



б)

Рисунок 6.14 – Види пружних хвиль

а) – поздовжня хвиля; б) – поперечна хвиля

Основними кінематичними характеристиками пружної хвилі є її амплітуда, частота, період, її довжина та швидкість поширення. Амплітуда (A) визначає максимальне відхилення частинки від положення рівноваги. Період (T) – це час одного повного коливання, а частота ν – кількість коливань за одиницю часу.

Зв'язок між ними визначається з наступного рівняння:

$$v = \frac{1}{T}. \quad (6.33)$$

Проте для опису хвильового процесу у просторі вводять поняття довжини хвилі λ , яка є відстанню між двома найближчими точками, що коливаються в однаковій фазі. Швидкість поширення хвилі v пов'язана із цими параметрами наступним співвідношенням:

$$v = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T}. \quad (6.34)$$

Важливо розуміти, що швидкість хвилі залежить від пружних властивостей середовища та його густини. Наприклад, у тонкому сталевому стержні швидкість поздовжньої хвилі визначається через модуль Юнга (E) та густину ρ , як:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.35)$$

Математично біжучу гармонічну хвилю, яка поширюється вздовж осі x , описують хвильовим рівнянням:

$$x(x, t) = A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (6.36)$$

де $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота;

$k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, яке показує зміну фази хвилі на одиницю відстані.

Величину $(\omega t - kx + \varphi_0)$ прийнято називати фазою хвилі. Точки простору, в яких фаза має однакове значення, утворюють хвильову поверхню або фронт хвилі (рис. 6.15). За формою фронт хвилі буває плоским, сферичним або циліндричним.

Енергетична характеристика пружних хвиль є ключовою для розуміння їх взаємодії з об'єктами. Оскільки часточки середовища рухаються, вони мають кінетичну енергію, а оскільки середовище деформується – воно має потенціальну енергію пружної деформації. Повна енергія одиничного об'єму середовища називається об'ємною густиною енергії w . Для гармонічної хвилі її обчислюють за наступним виразом:

$$w = \frac{1}{2} \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2. \quad (6.37)$$

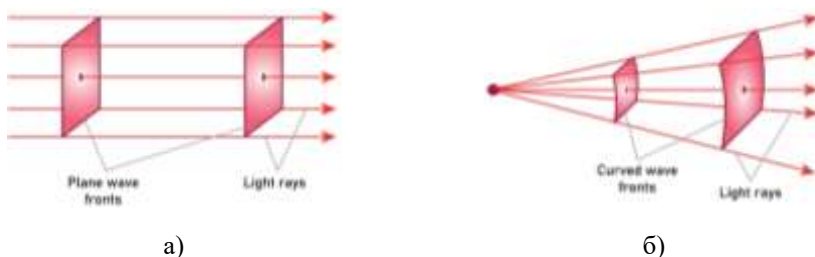


Рисунок 6.15 – Фронт хвилі
 а) – плоский; б) – сферичний

Цей вираз показує, що густина енергії прямо пропорційна квадрату амплітуди та квадрату частоти коливань. Проте енергія не стоїть на місці, вона переноситься хвилею. Для опису такого переносу використовують вектор густини потоку енергії, який називають вектором Умова. Модуль цього вектора, або інтенсивність хвилі I , визначають як середню енергію, яка проходить через одиничну площу, яка є перпендикулярною до напрямку поширення хвилі, за одиницю часу:

$$I = w \cdot v = \frac{1}{2} \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot v. \quad (6.38)$$

Одиницею вимірювання інтенсивності є $\text{Вт}/\text{м}^2$.

У процесі поширення хвилі в реальних середовищах спостерігається явище дисипації – поступового переходу енергії впорядкованого хвильового руху в енергію теплового руху молекул. Це призводить до згасання хвилі, тобто зменшення її амплітуди з відстанню. Коефіцієнт поглинання залежить від в'язкості середовища, теплопровідності та частоти хвилі (високочастотні хвилі зазвичай згасають швидше).

Особливим випадком є суперпозиція (накладання) хвиль. Якщо дві хвилі однакової частоти поширюються назустріч одна одній, виникає стояча хвиля. Для стоячих хвиль притаманні як вузли (точки, де амплітуда завжди нульова), так і клубки (точки з максимальною амплітудою). На відміну від біжучої, стояча хвиля не переносить енергію у просторі; відбувається лише постійний перехід кінетичної енергії в потенціальну і навпаки в межах кожної ділянки між вузлами.

6.15 Електромагнітні хвилі

Історія вивчення електромагнетизму є одним із найяскравіших прикладів

того, як теоретична думка випереджає експериментальне підтвердження. У середині XIX століття Д. К. Максвелл, аналізуючи роботи Фарадея, висунув революційну гіпотезу: якщо змінне магнітне поле породжує електричне, то має існувати й зворотний процес – змінне електричне поле повинно створювати магнітне. Це взаємне перетворення полів утворює єдиний процес, який поширюється у просторі у вигляді хвилі.

Електромагнітна хвиля – це процес поширення в просторі змінного електромагнітного поля. Основною особливістю цих хвиль є те, що для їх поширення не потрібне середовище; вони чудово почуваються у вакуумі, що відрізняє їх від механічних хвиль.

Математичним фундаментом цієї теорії є система рівнянь Максвелла, яка описує взаємозв'язок електричного та магнітного полів. Важливим висновком теорії стало те, що вектори напруженості електричного поля E та індукції магнітного поля B у хвилі завжди перпендикулярні не тільки один до одного, але й до напрямку поширення самої хвилі. Це означає, що електромагнітні хвилі за своєю природою є виключно поперечними.

Швидкість поширення цих хвиль у вакуумі є фундаментальною константою й рівна $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Максвелл першим зауважив, що ця швидкість збігається із швидкістю світла, що дозволило йому зробити висновок: світло – це також електромагнітна хвиля.

Для характеристики хвилі прийнято використовувати такі параметри, як частоту (f) та довжину хвилі (λ). Довжина хвилі – це відстань, на яку вона поширюється за один період коливань. Взаємозв'язок між ними описують наступним виразом:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (6.39)$$

У середовищі швидкість хвилі v завжди менша за швидкість у вакуумі й залежить від діелектричної (ϵ) та магнітної (μ) проникностей матеріалу:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}. \quad (6.40)$$

Джерелом електромагнітних хвиль є електричні заряди, які рухаються з прискоренням. Це може бути коливання електронів у антені або процеси всередині атомів. Першим, хто експериментально підтвердив існування цих хвиль, був Г. Герц. Використовуючи сконструйований ним вібратор (відкритий коливальний контур), він зумів випромінити та зафіксувати хвилі, довівши, що

вони мають ті самі властивості, що й світло: відбивання, заломлення та інтерференцію.

Увесь діапазон електромагнітних хвиль прийнято поділяти на кілька основних видів залежно від довжини хвилі та енергії, яку вони несуть (рис. 6.16).

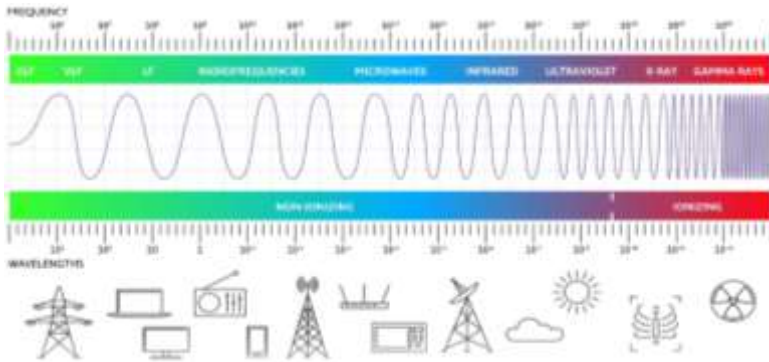


Рисунок 6.16 – Спектр електромагнітних хвиль

Низькочастотні коливання та радіохвилі займають великий проміжок спектру – від кілометрових довжин до міліметрових. Вони використовуються у радіозв'язку, телебаченні та радіолокації. Далі йде інфрачервоне випромінювання, яке ми відчуваємо у вигляді тепла (його випромінюють усі нагріті тіла). Вузька смужка видимого світла (від 380 до 760 нанометрів) – це єдина частина спектра, яку людське око здатне сприймати безпосередньо. За ним йде ультрафіолетове випромінювання. Рентгенівське випромінювання має високу проникну здатність. Найвищу енергію має гамма-випромінювання, яке виникає під час ядерних реакцій та володіє великою руйнівною силою.

Електромагнітні хвилі здатні переносити енергію. Щільність потоку цієї енергії описується вектором Пойнтінга (S). Величину енергії, яка проходить через одиницю площі за одиницю часу, називають інтенсивністю хвилі I . Важливо розуміти, що інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди коливань: $I \sim E^2$. Також хвилі тиснуть на поверхні, на які вони падають. Хоча світловий тиск дуже малий у земних умовах, він відіграє ключову роль у космосі.

Сучасна цивілізація неможлива без використання електромагнітних хвиль. Ми живемо в океані сигналів: від Wi-Fi роутера у квартирі до супутників GPS на орбіті. Розуміння природи цих хвиль дозволило людству перейти від первісної передачі сигналів до миттєвого обміну інформацією на відстані.

6.16 Основні характеристики звуку

Звук є складним фізичним явищем, яке супроводжує людину протягом усього життя, будучи одночасно об'єктом дослідження фізики (акустики) та предметом сприйняття фізіології й психології. З фізичної точки зору, звук – це механічні пружні хвилі, які поширюються у газах, рідинах та твердих тілах. Ці хвилі виникають внаслідок коливань частинок середовища навколо положення рівноваги. Важливо розуміти, що звук не може поширюватися у вакуумі, оскільки для передачі коливань необхідна наявність речовини. Основними характеристиками, які здатні описати природу звуку, є його частота, довжина хвилі, амплітуда та швидкість поширення.

Швидкість звуку суттєво залежить від середовища: у повітрі за температури 20°C вона становить приблизно 343 м/с, тоді як у воді досягає 1500 м/с, а в сталі – понад 5000 м/с. Це пояснюється різною густиною та пружністю матеріалів.

Однією з ключових характеристик звуку є частота коливань (f), яка вимірюється в герцах (Гц). Один Герц відповідає одному коливанню за секунду. Людське вухо здатне сприймати звуки в діапазоні від 20 Гц до 20 кГц. Звукові хвилі з частотою нижче 20 Гц прийнято називати інфразвуком, а вище 20 кГц – ультразвуком. У музиці та психоакустиці частота безпосередньо корелюється із суб'єктивним відчуттям висоти звуку: чим більша частота, тим вище ми сприймаємо звук. Зв'язок між частотою, швидкістю та довжиною хвилі описується фундаментальним виразом (6.39).

Цей вираз демонструє зворотну залежність: низькочастотні звуки (баси) мають велику довжину хвилі, що дозволяє їм легше оминати перешкоди, тоді як високочастотні звуки мають малу довжину хвилі та швидше затухають.

Наступною важливою характеристикою є інтенсивність (або сила) звуку, що визначається енергією, яка переноситься хвилею через одиницю площі за одиницю часу. Фізично інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди коливань. Суб'єктивним відображенням інтенсивності є гучність. Оскільки діапазон енергій, які сприймає людське вухо, надзвичайно широкий (від ледь чутного шелесту листя до гуркоту реактивного двигуна), для вимірювання гучності використовують логарифмічну шкалу – децибели (дБ). Поріг чутності приймають за 0 дБ, тоді як больовий поріг становить близько 120-130 дБ.

Важливо пам'ятати, що гучність залежить не тільки від інтенсивності, а й від частоти: людське вухо найбільш чутливе до середніх частот (1-4 кГц) і гірше сприймає дуже низькі або дуже високі звуки за тієї ж самої фізичної потужності.

Окрім висоти та гучності, звук характеризується тембром. Саме тембр дозволяє нам відрізнити звук скрипки від звуку фортепіано, навіть якщо вони грають одну й ту саму ноту з однаковою гучністю. Фізично це пояснюється тим,

що більшість природних звуків не є чистими синусоїдальними коливаннями. Вони складаються з основного тону (найнижча частота в наборі) та обертонів (гармонік). Спектральний склад звуку, тобто кількість та амплітуда цих додаткових частот, і створює унікальне «забарвлення» звуку. Гармоніки, зазвичай, є кратними основній частоті: якщо основний тон має частоту f_0 , то гармоніки будуть $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ тощо.

Процес поширення звуку супроводжується й такими явищами, як відбивання, заломлення, дифракція та інтерференція. Відбивання звуку від перешкод призводить до появи ехо (відлуння) або реверберації (поступового згасання звуку в закритому приміщенні внаслідок багаторазових відбитків). Реверберація має величезне значення в архітектурній акустиці: занадто довга реверберація робить мову нерозбірливою, а занадто коротка – робить звук «сухим» і неприродним. Дифракція дозволяє звуковим хвилям огинати перешкоди, розміри яких співмірні з довжиною хвилі, що пояснює, чому ми чуємо людину, яка стоїть за рогом будівлі.

На завершення варто згадати про ефект Доплера, який полягає у зміні частоти звуку, яка сприймається спостерігачем, внаслідок відносного руху джерела звуку або спостерігача. Коли джерело наближається, частота звуку здається вищою, а коли віддаляється – нижчою. Цей ефект описується наступним рівнянням:

$$f = f_0 \frac{(v \pm v_{сп})}{(v \mp v_{дж})}, \quad (6.41)$$

де $v_{сп}$ – швидкість спостерігача;

$v_{дж}$ – швидкість джерела.

Рекомендована література: [1; 4; 6; ;9 10; 11; 12; 16; 17].

Запитання для самоконтролю

1. Від яких фізичних параметрів хвилі та характеристик середовища залежить інтенсивність перенесення енергії, і чому на відміну від біжучої хвилі стояча хвиля не здатна здійснювати такий перенос у просторі?

2. На основі результатів експериментів Г.Герца та аналізу шкали електромагнітних хвиль обгрунтуйте, чому видиме світло вважається лише частиною загального спектра випромінювання і які фізичні параметри визначають відмінності між рентгеновським та гамма-випромінюванням?

3. У чому полягає відмінність у механізмі дії магнітного поля на провідник зі струмом згідно із законом Ампера порівняно з його впливом на окрему рухома заряджену частинку?

4. У чому полягає сутність принципу суперпозиції електричних полів? За якою ознакою електростатичне поле класифікують як потенціальне у контексті виконання роботи з переміщення заряду?

5. У чому полягає фізична відмінність між прямим та зворотним п'єзоелектричними ефектами? Як математично виражається залежність величини отриманого заряду від прикладеної механічної сили?

6. Чим зумовлена здатність домішкового внутрішнього фотоефекту реагувати на довгохвильове інфрачервоне випромінювання та якими особливостями кінетики пояснюється інерційність приладів, що працюють на основі цього явища?

7. Чому в режимі короткого замикання сила струму в повному колі різко зростає до критичних значень і які внутрішні характеристики джерела енергії обмежують її в цей момент?

8. Чому для зменшення втрат енергії в лініях електропередач вигідніше використовувати трансформатори для підвищення напруги, ніж просто збільшувати товщину дротів? Як це пов'язано із математичною залежністю кількості теплоти від сили струму?

9. Чому під час електростатичної індукції увесь надлишковий заряд зосереджується лише на зовнішній поверхні провідника?

10. Чому явище самоіндукції перешкоджає миттєвій зміні сили струму в електричному колі та від яких параметрів провідника залежить енергія його магнітного поля?

11. Як залежить значення сили Ампера від взаємного розташування провідника та ліній магнітної індукції і за якої умови ця сила стає максимальною?

12. Як зміниться кінетична енергія та модуль швидкості зарядженої частинки під час її руху в однорідному магнітному полі під дією сили Лоренца?

13. Як зміниться сила струму в ділянці кола за законом Ома, якщо напругу на її кінцях збільшити, а опір залишити незмінним?

14. Як зміниться сила струму на ділянці кола, якщо напругу на її кінцях збільшити у три рази, за умови, що електричний опір провідника такий же?

15. Як саме перерозподіл вільних електронів у металевому провіднику забезпечує нульову напруженість сумарного електричного поля всередині нього?

16. Як середовище поширення та спектральний склад коливань впливають на фізичні властивості звуку?

17. Яка основна фізична умова повинна виконуватися для хвиль, щоб при їх накладанні у просторі виникла стійка інтерференційна картина з чітким перерозподілом максимумів та мінімумів освітленості?

18. Яка принципова відмінність існує між поздовжніми та поперечними хвилями, з точки зору напрямку коливань частинок середовища, та в яких агрегатних станах речовини може поширюватися кожен із цих типів хвиль?

19. Яка принципова відмінність у механізмі руху електронів розрізняє внутрішній фотоефект і зовнішній? Як зонна теорія пояснює виникнення власної фотопровідності в напівпровідниках?

20. Яка структурна особливість кристалічної решітки діелектрика є обов'язковою умовою для виникнення п'єзоелектричного ефекту? Як змінюється стан центрів зарядів у матеріалі під час його механічної деформації?

21. Яка фізична величина є силовою характеристикою електричного поля? Як вона розраховується через силу, яка діє на заряд, та яким чином її напрямок залежить від знаку цього заряду?

22. Яка фізична властивість світлових хвиль, що не пояснюється геометричною оптикою, підтверджується явищем поляризації, і за якої умови відбитий від межі двох діелектриків промінь стає повністю плоскополяризованим?

23. Яка фізична умова має виконуватися для встановлення стану рівноваги, під час якого припиняється накопичення зарядів на гранях провідника та формується стала напруга Холла?

24. Яким чином відкриття ефекту Холла змінило наукове уявлення про природу носіїв заряду в металах? Яку роль відіграє знак сталої Холла у визначенні типу провідності напівпровідників?

25. Яким чином напрямок струмів у двох паралельних провідниках впливає на характер їх механічної взаємодії? Як це явище використовується для визначення одиниці сили струму в системі SI?

26. Яким чином правило Ленца пов'язане із законом збереження енергії? Як визначити напрям індукційного струму залежно від зміни магнітного потоку?

27. Яким чином теоретичне припущення Д. Максвелла, про взаємозв'язок змінних електричних і магнітних полів, пояснює поперечний характер електромагнітних хвиль та їхню здатність поширюватися у вакуумі?

28. Яким чином фізичні параметри звукової хвилі корелюються із суб'єктивним сприйняттям звуку людиною, і як логарифмічна шкала допомагає класифікувати інтенсивність цих відчуттів?

29. Яким чином фізичні процеси на мікрорівні, зокрема взаємодія вільних електронів із частинками кристалічної ґратки, пояснюють перетворення електричної енергії на теплову за законом Джоуля-Ленца?

30. Які обов'язкові умови мають бути виконані, щоб у провіднику виник електричний струм?

31. Які умови необхідні для виникнення магнітного поля навколо електричного заряду? Чим структура його силових ліній принципово відрізняється від ліній електричного поля?

32. Якою буде траєкторія руху зарядженої частинки, якщо вона влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції?

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Modeling of Security Systems Ffor Critical Infrastructure Facilities : Monograph. URL: <http://monograph.com.ua/pctc/catalog/view/978-617-7319-57-2/117/419-2> (дата звернення 20.12.2025).

2. Грицунов О. В. Інформаційні системи та технології. URL: <https://surl.li/wijqjs> (дата звернення: 20.12.2025).

3. Гуржій А. М., Возненко Л. І., Поворознюк Н. І., Самсонов В. В. Основи інформаційних технологій : навч. посіб. Київ : Літера ЛТД, 2023. 288 с.

4. Інфрачервоне випромінювання в природі і технологіях. URL: <https://ok-kardinal.com.ua/infrakrasnoe-izluchenie-v-prirode-i-technologiyax> (дата звернення 20.12.2025).

5. Кайдик О. Л., Терлецький Т. В. Метрологія, стандартизація, сертифікація та управління якістю : конспект лекцій. Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2023. 140 с.

6. Кушнір А. П., Чалий Д. О. Системи пожежної та охоронної сигналізації : навч. посіб. Львів : СПОЛОМ, 2022. 298 с.

7. Лаванов Г. Ю., Решетняк С. О. Фізичні основи комп'ютерних систем : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 343 с.

8. Лебедь О. О., Мислінчук В. О., Войтович Л. В. Фізичні основи комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем : навч. посіб. Рівне : Волинські обереги, 2023. 352 с.

9. Пастернак Р. М. Фізика: конспект лекцій. Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2022. 173 с.

10. Принципи побудови систем охоронної сигналізації. URL: https://vlp.com.ua/files/14_3.pdf (дата звернення 20.12.2025).

11. Системи охорони периметру. URL: <http://www.prosb.org.ua/perimeter-security-system/> (дата звернення 20.12.2025).

12. Системи пожежної та охоронної сигналізації. URL: http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/297/Signal.pdf (дата звернення 20.12.2025).

13. Ситнік Б. Т. Основи інформаційних систем і технологій. URL: <https://surl.lt/vxfjxo> (дата звернення: 20.12.2025).

14. Сосницька Н. Л., Дьоміна Н. А., Морозов М. В., Онищенко Г. О. Фізичні основи сучасних інформаційних технологій. URL:

Фізичні основи інформаційних систем: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки» галузі знань F Інформаційні технології спеціальності F6 Інформаційні системи та технології денної та заочної форми навчання / уклад. О. Л. Кайдик, Т. В. Терлецький. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 144 с.

Комп'ютерний набір та верстка: О. Л. Кайдик.

Редактор: в авторській редакції.

Підп. до друку «__» _____ 2026 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк. арк. 9,0. Обл. – вид. арк. 8,42.
Тираж 50 прим. Зам. _____.

Луцький національний технічний університет
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75