

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

**Конспект лекцій
з дисципліни**

**«МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПТБДМіО»**

**для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
професійне спрямування «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні,
меліоративні машини і обладнання»**

Краматорськ
ДДМА
2019

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Загальні поняття про моделювання технічних систем. Класифікація моделей їх значення в теоретичних і експериментальних дослідженнях.....	8
1.1 Моделювання. Основні терміни і поняття. Класифікація моделей...	8
1.2 Основні положення теорії подібності і моделювання технічних систем.....	11
2 Об'єкти вимірювань	18
2.1 Поняття фізичної величини та її одиниці вимірювання.....	18
2.2 Шкали вимірювань	21
2.3 Системи одиниць фізичних величин.....	22
2.4 Міжнародна система одиниць фізичних величин.....	24
3 Математичні моделі в дослідженні підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних машин і обладнання.....	31
3.1 Розробка математичних моделей у дослідженнях підйомно-транспортних машин.....	31
3.2 Класифікація математичних моделей.....	32
3.3 Ступеневі комплекси.....	34
3.4 Статистична обробка даних.....	35
3.5 Відповідність і відповідне моделювання.....	35
3.6 Точність математичного моделювання.....	37
3.7 Наближені моделі об'єктів на мікрорівні.....	39
3.8 Загальні відомості про моделювання на макрорівні	40
4 Експериментальні методи дослідження напруженого стану металоконструкцій та деталей підйомно-транспортних і будівельних машин.....	41
4.1 Аналіз експериментальних методів дослідження напруженого стану металоконструкцій і деталей кранів, екскаваторів і будівельних машин.....	41
4.2 Тензометричні методи вимірювання деформацій.....	44
4.3 Поляризаційно-оптичний метод.....	54
4.4 Метод муарових смуг.....	55
4.5 Рентгенографічний метод вимірювання тиску.....	55
4.6 Метод тендітних покриттів.....	56
4.7 Метод гальванічних покриттів.....	57
4.8 Ультразвуковий метод визначення напруг.....	57
Перелік посилань.....	59

ВСТУП

Моделювання, дослідження об'єктів пізнання на їх моделях; побудова і вивчення моделей реально існуючих предметів і явищ (живих і неживих систем, інженерних конструкцій, різноманітних процесів - фізичних, хімічних, біологічних, соціальних) і конструйованих об'єктів (для визначення, уточнення їх характеристик, раціоналізації способів їх побудови і т. п.).

М. як пізнавальний прийом невіддільно від розвитку знання. По суті, М. як форма відображення дійсності зароджується в античну епоху одночасно з виникненням наукового пізнання. Проте у виразній формі (хоча без використання самого терміну) М. починає широко використовуватися в епоху відродження; Брунеллески, Мікеланжело і інші італійські архітектори і скульптори користувалися моделями проєктованих ними споруд; у теоретичних же роботах Г. Галілея і Леонардо да Вінчі не лише використовуються моделі, але і з'ясовуються межі застосовності методу М. И. Ньютон користується цим методом вже цілком усвідомлено, а в 19-20 вв. важко назвати галузь науки або її застосувань, де М. не мало б істотного значення; виключно велику методологічну роль зіграли в цьому відношенні роботи Кельвіна, Джоуль. Максвелла, Ф. А. Кекуле, А. М. Бутлерова і інших фізиків і хіміків - саме ці науки стали, можна сказати, класичними "полігонами" методів М. Поява ж перших електронних обчислювальних машин (Джоуль. Нейман, 1947) і формулювання основних принципів кібернетики (Н. Вінер, 1948) привели до воістину універсальної значущості нових методів - як в абстрактних областях знання, так і в їх застосуваннях. М. нині набуло загальнонаукового характеру і застосовується в дослідженнях живої і неживої природи, в науках про людину і суспільство (див. Моделі у біології, Моделі в економіці, Моделі в мовознавстві, Ядерні моделі).

Єдина класифікація видів М. скрутна в силу багатозначності поняття "модель" в науці і техніці. Її можна проводити по різних підставах: за характером моделей (т. е. по засобах М.); за характером модельованих об'єктів; по сферах додатка М. (М. в техніці, у фізичних науках, в хімії, М. процесів живого, М. психіки і т. п.) і його рівням ("глибині"), починаючи, наприклад, з виділення у фізику М. на мікрорівні (М. на рівнях дослідження, що стосуються елементарних часток, атомів, молекул). У зв'язку з цим будь-яка класифікація методів М. приречена на неповноту, тим паче, що термінологія в цій області спирається не стільки на "суворі" правила, скільки на мовні, наукові і практичні традиції, а ще частіше визначається у рамках конкретного контексту і поза ним ніякого стандартного значення не має (типовий приклад - термін "кібернетичне" М.).

Предметним називається М., в ході якого дослідження ведеться на моделі, відтворюючій основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні характеристики "оригіналу". На таких моделях вивчаються процеси, що відбуваються в оригіналі - об'єкті дослідження або розробки (вивчення на моделях властивостей будівельних конструкцій, різних механізмів, транспортних засобів і т. п.).

Якщо модель і модельований об'єкт мають одну і ту ж фізичну природу, то говорять про фізичному М. (див. Моделювання фізичне). Явище (система, процес)

може досліджуватися і шляхом досвідченого вивчення яких-небудь явища іншої фізичної природи, але такого, що воно описується тими ж математичними співвідношеннями, що і модельоване явище. Наприклад, механічні і електричні коливання описуються одними і тими ж диференціальними рівняннями; тому за допомогою механічних коливань можна моделювати електричні і навпаки. Таке "предметно-математичне" М. широко застосовується для заміни вивчення одних явищ вивченням інших явищ, зручніших для лабораторного дослідження, зокрема тому, що вони допускають вимір невідомих величин (див. Моделювання аналогове). Так, електричне М. дозволяє вивчати на електричних моделях механічних, гідродинамічних, акустичних і інші явища. Електричне М. лежить в основі т. н. аналогових обчислювальних машин.

При знаковому М. моделями служать знакові утворення якого-небудь виду : схеми, графіки, креслення, формули, графи, слова і пропозиції в деякому алфавіті (природної або штучної мови) (див. Знак, Семіотика).

Найважливішим видом знакового М. є математичне (логіко-математичне) М., здійснюване засобами мови математики і логіки (см Математична модель). Знакові утворення і їх елементи завжди розглядаються разом з певними перетвореннями, операціями над ними, які виконує людина або машина (перетворення математичних, логічних, хімічних формул, перетворення станів елементів цифрової машини, що відповідають знакам машинної мови, та ін.). Сучасна форма "матеріальної реалізації" знакового (передусім, математичного) М. - це М. на цифрових електронних обчислювальних машинах, універсальних і спеціалізованих. Такі машини - це свого роду "чисті бланки", на яких в принципі можна зафіксувати опис будь-якого процесу (явища) у вигляді його програми, т. е. закодованої на машинній мові системи правил, наслідуючи які машина може "відтворити" хід модельованого процесу.

Дії зі знаками завжди в тій чи іншій мірі пов'язані з розумінням знакових утворень і їх перетворень : формули, математичні рівняння і т. п. вираження вживаного при побудові моделі наукової мови певним чином інтерпретуються (тлумачаться) в поняттях тієї предметної області, до якої відноситься оригінал (см Інтерпретація). Тому реальна побудова знакових моделей або їх фрагментів може замінюватися подумки-наочним представленням знаків і (чи) операцій над ними. Цей різновид знакового М. іноді називається уявним М. Втім, цей термін часто застосовують для позначення "інтуїтивного" М., що не використовує ніяких чітко фіксованих знакових систем, а що протікає на рівні "модельних представлень". Таке М. є неодмінна умова будь-якого пізнавального процесу на його початковій стадії.

За характером тієї сторони об'єкту, яка піддається М., доречно розрізняти М. структури об'єкту і М. його поведінки (функціонування процесів, що протікають в ній, і т. п.). Це розрізнення суто відносно для хімії або фізики, але воно придбаває чіткий сенс в науках про життя, де розрізнення структури і функції систем живого належить до числа фундаментальних методологічних принципів дослідження, і в кібернетиці, що робить акцент на М. функціонування систем, що вивчаються. При "кібернетичному" М. зазвичай абстрагуються від структури системи, розглядаючи її як "чорний ящик", опис (модель) якого будується в термінах співвідношення між

станами його "входів" і "виходів" ("входи" відповідають зовнішнім діям на систему, що вивчається, "виходи" - її реакціям на них, т. е. поведінці).

Для ряду складних явищ (наприклад, турбулентності, пульсацій в областях відриву потоку і т. п.) користуються стохастичним М., ґрунтованим на встановленні вірогідності тих або інших подій. Такі моделі не відбивають увесь хід окремих процесів в цьому явищі, що носять випадковий характер, а визначають деякий середній, сумарний результат.

Поняття М. є гносеологічною категорією, що характеризує один з важливих шляхів пізнання. Можливість М., т. е. перенесення результатів, отриманих в ході побудови і дослідження моделей, на оригінал, ґрунтована на тому, що модель в певному значенні відображає (відтворює, моделює) які-небудь його риси; при цьому таке відображення (і пов'язана з ним ідея подібності) засноване, явно або неявно, на точних поняттях ізоморфізму або гомоморфізму (чи їх узагальненнях) між об'єктом, що вивчається, і деяким іншим об'єктом "оригіналом" і часто здійснюється шляхом попереднього дослідження (теоретичного або експериментального) того і іншого. Тому для успішного М. корисна наявність теорій досліджуваних явищ, що вже склалися, або хоч би задовільно обґрунтованих теорій і гіпотез, що вказують гранично допустимі при побудові моделей спрощення. Результативність М. значно зростає, якщо при побудові моделі і перенесенні результатів з моделі на оригінал можна скористатися деякою теорією, що уточнює пов'язану з використовуваною процедурою М. ідею подібності. Для явищ однієї і тієї ж фізичної природи така теорія, ґрунтована на використанні поняття розмірності фізичних величин, добре розроблена (див. Моделювання фізичне, Подібності теорія). Але для М. складних систем і процесів, що вивчаються, наприклад, в кібернетиці, аналогічна теорія ще не розроблена, чим і обумовлений інтенсивний розвиток теорії великих систем - загальній теорії побудови моделей складних динамічних систем живої природи, техніки і соціально-економічної сфери.

М. завжди використовується разом з ін. загальнонауковими і спеціальними методами. Передусім М. тісно пов'язано з експериментом. Вивчення якого-небудь явища на його моделі (при предметному, знаковому М., М. на ЕОМ) можна розглядати як особливий вид експерименту : "модельний експеримент", що відрізняється від звичайного ("прямого") експерименту тим, що в процес пізнання включається "проміжна ланка" - модель, що є одночасно і засобом, і об'єктом експериментального дослідження, замінюючим об'єкт, що вивчається. Модельний експеримент дозволяє вивчати такі об'єкти, прямий експеримент над якими ускладнений, економічно не вигідний, або взагалі неможливий в силу тих або інших причин [М. унікальних (наприклад, гідротехнічних) споруд, складних промислових комплексів, економічних систем, соціальних явищ, процесів, що відбуваються в космосі, конфліктів і бойових дій та ін.].

Дослідження знакових (зокрема, математичних) моделей також можна розглядати як деякі експерименти ("експерименти на папері", розумові експерименти). Це стає особливо очевидним у світлі можливості їх реалізації засобами електронної обчислювальної техніки. Один з видів модельного експерименту - модельно-кібернетичний експеримент, в ході якого замість "реального" експериментального оперування з об'єктом, що вивчається, знаходять

алгоритм (програму) його функціонування, який і виявляється своєрідною моделлю поведінки об'єкту. Вводячи цей алгоритм в цифрову ЕОМ і, як то кажуть, "програючи" його, отримують інформацію про поведінку оригіналу в певному середовищі, про його функціональні зв'язки з "місцем існування", що міняється.

Т. о., можна передусім розрізнити "матеріальне" (предметне) і "ідеальне" М.; перше можна трактувати як "експериментальне", друге - як "теоретичне" М., хоча таке протиставлення, звичайно, дуже умовне не лише в силу взаємозв'язку і обопільного впливу цих видів М., але і наявності таких "гібридних" форм, як "уявний експеримент". "Матеріальне" М. підрозділяється, як було сказано вище, на фізичне і предметно-математичне М., а часткою злучаємо останнього являється аналогове М. Далі, "ідеальне" М. може відбуватися як на рівні найзагальніших, можливо навіть не до кінця усвідомлених і фіксованих, "модельних представлень", так і на рівні досить деталізованих знакових систем; у першому випадку говорять про уявному (інтуїтивному) М., в другому - про знаковому М. (найважливіший і найбільш поширений вид його - логіко-математичне М.). Нарешті, М. на ЕОМ (часто іменоване "кібернетичним") є "предметно-математичним за формою, знаковим за змістом".

М. потрібне припускає використання абстрагування і ідеалізації. Відображаючи істотні (з точки зору мети дослідження) властивості оригіналу і відволікаючись від несуттєвого, модель виступає як специфічна форма реалізації абстракції, т. е. як деякий абстрактний об'єкт, що ідеалізується. При цьому від характеру і рівнів тих, що лежать в основі М. абстракцій і ідеалізацій великою мірою залежить увесь процес перенесення знань з моделі на оригінал; зокрема, істотне значення має виділення трьох рівнів абстракції, на яких може здійснюватися М. : рівня потенційної здійсненності (коли згадане перенесення припускає відвернення від обмеженості пізнавально-практичної діяльності людини у просторі та часі, див. Абстракції принцип), рівня "реальної" здійсненності (коли це перенесення розглядається як реально здійснений процес, хоча, можливо, лише в деякий майбутній період людської практики) і рівня практичної доцільності (коли це перенесення не лише здійснимо, але і бажаний для досягнення деяких конкретних пізнавальних або практичних завдань).

На усіх цих рівнях, проте, доводиться зважати на те, що М. цього оригіналу може ні на якому своєму етапі не дати повного знання про нього. Ця риса М. особливо істотна у тому випадку, коли предметом М. є складні системи, поведінка яких залежить від значного числа взаємозв'язаних чинників різної природи. В ході пізнання такі системи відображаються в різних моделях, більш менш виправданих; при цьому одні з моделей можуть бути спорідненими один одному, інші ж можуть виявитися глибоко різними. Тому виникає проблема порівняння (оцінки адекватності) різних моделей одного і того ж явища, що вимагає формулювання точно визначуваних критеріїв порівняння. Якщо такі критерії ґрунтуються на експериментальних даних, то виникає додаткова трудність, пов'язана з тим, що хороший збіг висновків, які виходять з моделі, з даними спостереження і експерименту ще не служить однозначним підтвердженням вірності моделі, т. до. можлива побудова інших моделей цього явища, які також підтверджуватимуться емпіричними фактами. Звідси - природність ситуації, коли створюються

взаємодоповнюючі або навіть такі, що суперечать один одному моделі явища; протиріччя можуть "зніматися" в ході розвитку науки (і потім з'являтися при М. на глибшому рівні). Наприклад, на певному етапі розвитку теоретичної фізики при М. фізичних процесів на "класичному" рівні використовувалися моделі, що мають на увазі несумісність корпускулярних і хвильових представлень; ця "несумісність" була "знята" створенням квантової механіки, в основі якої лежить теза про корпускулярно-хвильовий дуалізм, закладений в самій природі матерії.

Іншим прикладом такого роду моделей може служити М. різних форм діяльності мозку. Створювані моделі інтелекту і психічних функцій - наприклад, у вигляді евристичних програм для ЕОМ - показують, що М. мислення як інформаційного процесу можливо в різних аспектах (дедуктивному - формально-логічному, см Дедукція; індуктивному - см Індукція; нейтрологіческом, евристичному, - см Евристика), для "узгодження" яких потрібні подальші логічні, психологічні, фізіологічні, еволюційно-генетичні і модельно-кібернетичні дослідження.

М. глибоко проникає в теоретичне мислення. Більше того, розвиток будь-якої науки в цілому можна трактувати - в дуже загальному, але цілком розумному сенсі, - як "теоретичне М". Важлива пізнавальна функція М. полягає в тому, щоб служити імпульсом, джерелом нових теорій. Нерідко буває так, що теорія спочатку виникає у вигляді моделі, що дає наближене, спрощене пояснення явища, і виступає як первинна робоча гіпотеза, яка може перерости в "передтеорію" - попередницю розвиненої теорії. При цьому в процесі М. виникають нові ідеї і форми експерименту, відбувається відкриття раніше невідомих фактів. Таке "переплетення" теоретичного і експериментального М. особливо характерно для розвитку фізичних теорій (наприклад, молекулярно-кінетичною або теорії ядерних сил).

М. - не лише одно із засобів відображення явищ і процесів реального світу, але і - незважаючи на описану вище його відносність - об'єктивний практичний критерій перевірки істинності наших знань, здійснюваної безпосередньо або за допомогою встановлення їх відношення до іншої теорії, що виступає моделлю, адекватність якої вважається практично обґрунтованою. Застосовуючись в органічній єдності з іншими методами пізнання, М. виступає як процес поглиблення пізнання, його рухи від відносно бідних інформацією моделей до моделей змістовніших, що повніше розкривають суть досліджуваних явищ дійсності.

При М. більш менш складних систем зазвичай застосовують різні види М. Приклади див. нижче в розділах про М. енергосистем і М. хімічних реактивів.

РОЗДІЛ 1

1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ. КЛАСИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ЇХ ЗНАЧЕННЯ В ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

1.1 Моделювання. Основні терміни і поняття. Класифікація моделей

Моделювання, дослідження об'єктів пізнання на їх моделях; побудова і вивчення моделей реально існуючих предметів і явищ (живих і неживих систем, інженерних конструкцій, різноманітних процесів – фізичних, хімічних, біологічних, соціальних) і конструйованих об'єктів (для визначення, уточнення їх характеристик, раціоналізації способів їх побудови і т.п.).

Моделювання як пізнавальний прийом невіддільно від розвитку знання. По суті, моделювання як форма відображення дійсності зароджується в античну епоху одночасно з виникненням наукового пізнання. Проте у виразній формі (хоча без використання самого терміну) моделювання починає широко використовуватися в епоху відродження; Брунеллески, Мікеланджело і інші італійські архітектори і скульптори користувалися моделями проєктованих ними споруд; у теоретичних же роботах Г. Галілея і Леонардо да Вінчі не лише використовуються моделі, але і з'ясовуються межі застосовності методу моделювання. І. Ньютон користується цим методом вже цілком усвідомлено, а в 19-20 вв. Важко назвати галузь науки або її застосувань, де моделювання не мало б істотного значення; виключно велику методологічну роль зіграли в цьому відношенні роботи Кельвіна, Джоуль. Максвелла, Ф. А. Кекуле, А. М. Бутлерова і інших фізиків і хіміків – саме ці науки стали, можна сказати, класичними «полігонами» методів моделювання. Поява ж перших електронних обчислювальних машин (Джоуль. Нейман, 1947) і формулювання основних принципів кібернетики (Н. Вінер, 1948) привели до воістину універсальної значущості нових методів – як в абстрактних областях знання, так і в їх застосуваннях. Моделювання нині набуло загальнонаукового характеру і застосовується в дослідженнях живої і неживої природи, в науках про людину і суспільство (див. *Моделі у біології, Моделі в економіці, Моделі в мовознавстві, Ядерні моделі*).

Предметним називається моделювання, в ході якого дослідження ведеться на моделі, відтворюючій основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні характеристики «оригіналу». На таких моделях визначаються процеси, що відбуваються в оригіналі – об'єкті дослідження або розробки (вивчення на моделях властивостей будівельних конструкцій, різних механізмів, транспортних засобів і т.п.).

Якщо модель і модельований об'єкт мають одну і ту ж фізичну природу, то говорять про фізичне моделювання (див. *Моделювання фізичне*). Явище (система, процес) може досліджуватися і шляхом досвідченого вивчення якого-небудь явища іншої фізичної природи, але такого, що воно описується тими ж математичними співвідношеннями, що і модельоване явище. Наприклад, механічні і електричні

коливання описуються одними і тими ж диференціальними рівняннями; тому за допомогою механічних коливань можна моделювати електричні і навпаки. Таке «предметно-математичне» моделювання широко застосовується для заміни вивчення одних явищ вивченням інших явищ, зручніших для лабораторного дослідження, зокрема тому, що вони допускають вимір невідомих величин (див. *Моделювання аналогове*). Так, електричне моделювання дозволяє вивчати на електричних моделях механічні, гідродинамічні, акустичні і інші явища. Електричне моделювання лежить в основі аналогових обчислювальних машин.

При знаковому моделюванні моделями служать знакові утворення якого-небудь виду: схеми, графіки, креслення, формули, графи, слова і пропозиції в деякому алфавіті (природної або штучної мови) (див. *Знак, Семіотика*).

Найважливішим видом знакового моделювання є математичне (логіко-математичне) моделювання, здійснюване засобами мови математики і логіки (див. *Математична модель*). Знакові утворення і їх елементи завжди розглядаються разом з певними перетвореннями, операціями над ними, які виконує людина або машина (перетворення математичних, логічних, хімічних формул, перетворення станів елементів цифрової машини, що відповідають знакам машинної мови, та ін.). Сучасна форма «матеріальної реалізації» знакового (передусім, математичного) моделювання – це моделювання на цифрових електронних обчислювальних машинах, універсальних і спеціалізованих. Такі машини – це свого роду «чисті бланки», на яких в принципі можна зафіксувати опис будь-якого процесу (явища) у вигляді його програми, тобто закодованої на машинній мові системи правил, наслідуючи які машина може «відтворити» хід модельованого процесу.

Дії зі знаками завжди в тій чи іншій мірі пов'язані з розумінням знакових утворень і їх перетворень: формули, математичні рівняння і т.п. вираження вживаного при побудові моделі наукової мови певним чином інтерпретуються (тлумачаться) в поняттях тієї предметної області, до якої відноситься оригінал (див. *Інтерпретація*). Тому реальна побудова знакових моделей або їх фрагментів може змінюватися подумки-наочним представленням знаків і (чи) операцій над ними. Цей різновид знакового моделювання іноді називається уявним моделюванням. Втім, цей термін часто застосовують для позначення «інтуїтивного» моделювання, що не використовує ніяких чітко фіксованих знакових систем, а що протікає на рівні «модельних представлень». Таке моделювання є неодмінна умова будь-якого пізнавального процесу на його початковій стадії.

Моделювання завжди використовується разом з іншими загальнонауковими і спеціальними методами. Передусім моделювання тісно пов'язано з експериментом. Вивчення якого-небудь явища на його моделі (при предметному, знаковому моделюванні або моделюванні на ЕОМ) можна розглядати як особливий вид експерименту: «модельний експеримент», що відрізняється від звичайного («прямого») експерименту тим, що в процес пізнання включається «проміжна ланка» - модель, що є одночасно і засобом, і об'єктом експериментального дослідження, замінюючи об'єкт, що вивчається. Модельний експеримент дозволяє вивчати такі об'єкти, прямий експеримент над якими ускладнений, економічно не вигідний, або взагалі неможливий в силу тих або інших причин [моделювання унікальних (наприклад, гідротехнічних) споруд, складних промислових комплексів,

економічних систем, соціальних явищ, процесів, що відбуваються в космосі, конфліктів і бойових дій та ін..].

Дослідження знакових (зокрема, математичних) моделей також можна розглядати як деякі експерименти («експерименти на папері», розумові експерименти). Це стає особливо очевидним у світі можливості їх реалізації засобами електронної обчислювальної техніки. Один з видів модельного експерименту – модельно-кібернетичний експеримент, в ході якого замість «реального» експериментального оперування з об'єктом, що вивчається, знаходять алгоритм (програму) його функціонування, який і виявляється своєрідною моделлю поведінки об'єкту. Вводячи цей алгоритм в цифрову ЕОМ і, як то кажуть, «програючи» його, отримують інформацію про поведінку оригіналу в певному середовищі, про його функціональні зв'язки з «місцем існування», що міняється.

У господарському комплексі України на будівництві будинків, споруд і доріг працює велика кількість машин на базі будівельних універсальних екскаваторів, які виконують підйомно-транспортні, землерийні й допоміжні роботи. На привода виконавчих механізмів цих машин діють значні динамічні зусилля, викликані взаємодією робочого обладнання з неоднорідним зовнішнім середовищем, що веде до різких змін силових і кінематичних параметрів. Тому для приводів таких машин важливим є питання по зниженню динамічних навантажень, запобіганню можливих перевантажень приводів та металевих конструкцій.

Одним із напрямків забезпечення ефективної і надійної роботи технологічних машин є підвищення їх продуктивності і терміну роботи шляхом удосконалення систем за рахунок зниження динамічних характеристик робочого обладнання та підвищення працездатності окремих вузлів механізмів, що неможливо без всебічних теоретичних і експериментальних досліджень цих машин.

На кафедрі ПТМ ДДМА протягом багатьох років проводяться такі дослідження для вантажопідйомних кранів.

Методика досліджень включає наступні основні етапи:

- розробка структурних схем кранів, екскаваторів і окремих механізмів з метою виявлення взаємозв'язку між окремими елементами систем і системами механізмів;
- визначення силових і кінематичних параметрів систем, розробка еквівалентних схем і математичних моделей окремих механізмів та уточнення їх ролі в роботі машини;
- розробка математичних (динамічних) і імітаційних моделей з послідовними теоретичними дослідженнями окремих систем;
- обґрунтування визначальних параметрів цих систем та подальшому комп'ютерному моделюванню їх окремих елементів;
- фізичне моделювання механічних систем технологічних машин та зовнішнього середовища з яким вони взаємодіють з послідовними експериментальними дослідженнями;
- перевірка адекватності теоретичних і експериментальних досліджень та розробці відповідних рекомендацій для проектування і експлуатації. Тобто, дослідження механічних систем технологічних машин проводились у відповідності з вимогами теорії подібності і моделювання [1,2] з виконанням таких умов як:

відображення (виконується умова подібності між моделлю і оригіналом); репрезентація (заміна оригінала моделлю); екстраполяція (отримання нової інформації про поведінку оригінала).

Таким чином загальну схему досліджень механічних систем технологічних машин можна представити у вигляді слідкуючої схеми: структура механічної системи → математичні моделі → імітаційні моделі → комп'ютерні моделі окремих елементів → фізичні моделі → результат.

Моделювання є нероздільним сполученням науки і мистецтва (рис. 1).

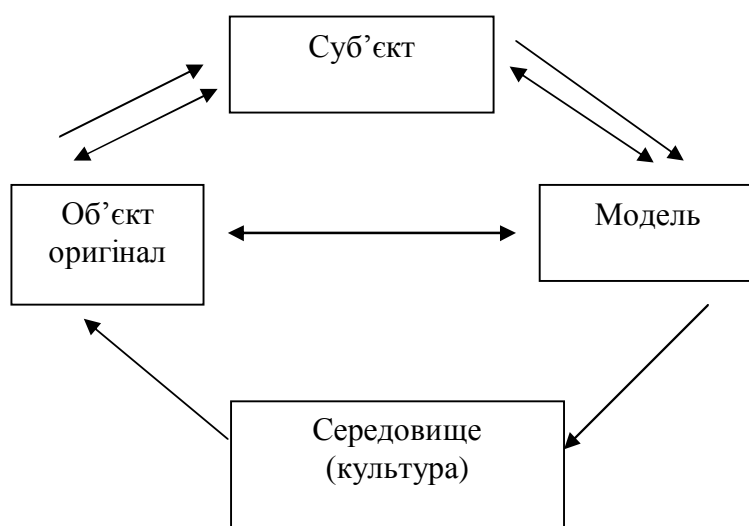


Рисунок 1.1 – Схема моделювання

Згідно представленої схеми нами розроблені математичні, комп'ютерні, імітаційні і фізичні моделі для дослідження: стрілових систем кранів і екскаваторів; динамічних навантажень на виконавчі механізми кранів і екскаваторів; стійкості стрілових кранів; енергоємності процесів взаємодії робочих органів землерийних машин з ґрунтом; працездатності окремих вузлів машин; нових конструкцій крокуючих і гусеничних рушіїв машин.

1.2 Основні положення теорії подібності і моделювання технічних систем

Моделювання деякого процесу передбачає:

- виявлення факторів, що впливають на процес;
- вибір факторів, які можуть бути описані кількісно;
- пояснення факторів за загальними ознаками і скорочення їх переліку (наприклад за допомогою критеріїв подібності);
- встановлення кількісних співвідношень між елементами процесу.

Критерії оцінювання.

Проблема вибору критерію полягає у встановленні ознак, за якими визначається пріоритет.

Мета остаточного аналізу – знайти оптимальні рішення проблем, або точніше запропонувати рішення проблем. Мовою системного аналізу цей процес називається субоптимізація.

Актуальність моделювання обумовлює:

- статичний підхід вимагає тривало функціонуючої і добре налагодженої системи збору і обробки кількісної інформації.
- експериментальний підхід не забезпечує належної оперативності виявлення потрібних закономірностей.

Моделювання починається з формалізації, під яким прийнято розуміти точне позбавлення двозначності та опис досліджуваних явищ:

- опис досліджуваних явищ;
- математизацію і алгоритмізацію досліджуваного явища;
- конструювання розвинених формалізованих систем.

Подібність систем розглядається як сукупність подібності характеристик:

- геометрична подібність представлена рівністю відповідних кутів α і пропорційністю всіх лінійних розмірів $\alpha_H = \alpha_M$,

$$\frac{l_{1H}}{l_{1M}} = \frac{l_{2H}}{l_{2M}} = \dots = \frac{l_{iH}}{l_{iM}} = const = k_L;$$

- кінематична подібність систем визначається тотожністю напрямку і пропорційністю величин часу, діючих швидкостей в прискорення

$$\frac{V_{1H}}{V_{1M}} = \frac{V_{2H}}{V_{2M}} = \dots = \frac{V_{iH}}{V_{iM}} = const = k_V;$$

- динамічна подібність систем визначається тотожністю напрямку дії і пропорційністю вектору сил G , або напруги σ

$$\frac{G_{1H}}{G_{1M}} = \frac{G_{2H}}{G_{2M}} = \dots = \frac{G_{iH}}{G_{iM}} = const = k_G,$$

де k_L, k_V, k_G – масштаби моделі.

Співвідношення розмірних величин, які залишаються незмінними при можливих співвідношеннях фізичних величин, називається критеріями подібності.

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)_H = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)_M = idem = \pi.$$

Наслідком I теореми подібності є отримане співвідношення, що дозволить визначити параметри об'єкта по відомим параметрам моделі.

Наприклад:

$$k_{P10} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)_M ; k_{P30} = \left(\frac{P_3}{P_2} \right)_M ,$$

де k_{P10}, k_{P30} – коефіцієнт визначені на основі об'єкта прийнятого за модель.

Теореми подібності.

Всяке рівняння фізичного процесу, що об'єднує між собою n величин $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$ серед яких m величини мають незалежні розмірності, можна привести до критеріального рівня, яке об'єднує $n - m$ критеріям подібності.

m – число фізичної величини з незалежною розмірністю;

$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3 \dots \pi_{n-m})$;

$k = n - m$ – число критеріїв подібності.

Необхідною і достатньою умовою подібності двох об'єктів, явищ, процесів – є пропорційність подібності x (схожих) параметрів, що входять в умови однозначності і рівність визначаючих критеріїв подібності.

Перша теорема подібності розглядає умови, які впливають з подібності явищ, і формулюється так: *подібні об'єкти (явища, процеси, системи, знакові утворення і ін.), мають індикатори подібності, рівні валюті, і чисельно однакові критерії подібності.* Для подібних об'єктів (рис. 2), один з яких є оригіналом, а іншою моделлю, які описуються рівняннями:

$$P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = 0,$$

$$P_{1M} + P_{2M} - P_{3M} = 0,$$

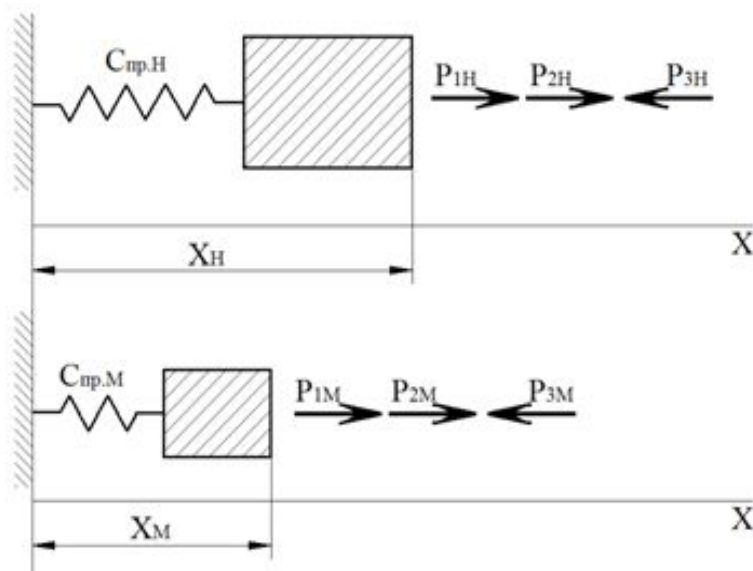
між відносинами масштабів, званими індикаторами подібності виконуються рівності:

$$k_{P1}/k_{P2} = 1; k_{P3}/k_{P2} = 1,$$

а відношення відповідних членів рівняння є інваріантні і не залежних від масштабу параметрів:

$$(P_1/P_2)_H = (P_1/P_2)_M = idem,$$

$$(P_3/P_2)_H = (P_3/P_2)_M = idem.$$



а – оригінал – система, яка моделюється;

б – модель – моделююча система;

P_1, P_2, P_3 – діючі сили; M – маса; C – приведена жорсткість

Рисунок 1.2 – Схема динамічних систем, що ілюструє основні положення теорії подібності

Дійсно, так як явища подібні, то повинна мати місце рівність рівнянь

$$P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = k_{P1}P_{2M} + k_{P2}P_{2M} - k_{P3}P_{3M},$$

де $k_{P1} = P_{1H}/P_{1M}; k_{P2} = P_{2H}/P_{2M}; k_{P3} = P_{3H}/P_{3M}$ – масштаби (коефіцієнти) величин;

P_i – параметри, що характеризують систему, наприклад мають природу сил, що діють на систему.

Для дотримання незмінності по відношенню до подібних перетворень членів рівняння необхідно, щоб коефіцієнти рівняння k_{P1}, k_{P2} та k_{P3} дорівнювали один одному. Так як k_{P1}, k_{P2} та k_{P3} є масштабами величин, то їх рівність дотримується в разі, якщо відносини:

$$(P_1/P_2)_H = (P_1/P_2)_M = idem,$$

$$(P_3/P_2)_H = (P_3/P_2)_M = idem$$

залишатимуться незмінними для подібних перетворень. Відповідні відносини розмірних величин, які залишаються незмінними при подібних перетвореннях, є критеріями (інваріантами) подібності та позначаються π або Π . Аргументи трансцендентних функцій є критеріями подібності.

Визначення параметрів оригіналу на підставі формул подібності.

Наслідком розглянутої положення є отримання співвідношень, що дозволяють визначити параметри об'єкта по відомим параметрам моделі. Якщо мають місце:

$$P_1/P_2 = idem; P_3/P_2 = idem,$$

$$P_1 = k_{P10}P_2; P_3 = k_{P30}P_2,$$

де $k_{P10} = (P_1/P_2)_M; k_{P30} = (P_3/P_2)_M$ – коефіцієнти, які визначаються на підставі об'єкта, прийнятого за модель.

Властивості критеріїв подібності. Вихідні рівняння є однорідними, так як всі їх члени мають однакову розмірність. Отримані критерії подібності є безрозмірними утвореннями. Вони визначають середню міру відносин між фізичними ефектами, істотними для даного процесу.

Критерії можна перетворити в критерії іншої форми і отримувати нові критерії шляхом операцій ділення та множення, отриманих спочатку, а також множенням або діленням їх на постійну безрозмірну величину. Однак загальна кількість критеріїв при цьому має залишатися без змін. Так, якщо $\Pi_k = idem; \Pi_{k+i} = idem$, тоді $\Pi_k/\Pi_{k+i} = idem; \Pi_k \Pi_{k+i} = idem$. Відповідно $1/\Pi_{k+i} = idem; k\Pi_{k+i} = idem$, де k – постійна безрозмірна величина.

Друга теорема подібності (π – теорема) дає можливість заміни рівняння між фізичними величинами залежністю між критеріями подібності і формулюється так: *будь-яке рівняння фізичного процесу, що об'єднує між собою n величин, $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$, серед яких t величин володіють незалежними розмірностями, можна перетворити на критерійне рівняння, яке пов'язує $n - t$ критеріїв подібності*

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-t}),$$

де $\Pi_{1,2,3}$ – безрозмірні величини, складені за певним законом з n величин (змінних і параметрів), що впливають на хід процесу;

t – число фізичних величин, що мають незалежні розмірності (число основних одиниць вимірювання повинно бути більше або дорівнює t).

Друга теорема подібності визначає необхідну і достатню кількість критеріїв подібності k , що визначають процес; $k = n - t$. Теорема дозволяє замінити змінні, скоротивши їх кількість з n розмірних величин до $n - t$ безрозмірних величин. Це спрощує обробку експериментів при знаходженні аналітичної залежності на узві регресійного полінома, отриманого в критеріальній формі.

Прийнято називати комплекси $\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-t}$ визначальними критеріями подібності. Такі безрозмірні комплекси містять незалежні змінні величини і величини входять в умови однозначності. Обумовленими критеріями подібності називають комплекси Π_1 , які містять залежну змінну як шукану величину. Суттєве

значення π – теорема полягає в можливості розповсюдження результатів експериментального або аналітичного дослідження з вивчення конкретного явища на ряд подібних явищ. При цьому важливо мати на увазі обмеження на межі суттєвості і сталості критеріїв подібності, що визначають перебіг досліджуваного явища при формуванні такого висновку. Важливим фактором, який слід, з π – теорема, є можливість знаходження критеріального рівняння, не маючи математической моделі процесу, основою тільки на аналізі відомих величин, що визначають процес, і їх розмірності.

Третя теорема подібності. *Необхідною і достатньою умовою подібності двох об'єктів (явищ, процесів, систем і ін.) Є пропорційність подібних параметрів, що входять в умови однозначності, і рівність визначальних критеріїв подібності.*

Під умовами однозначності розуміють геометричну характеристику просторової області (при дотриманні геометричної подоби), значення фізичних постійних, початкові і граничні умови.

Дійсно, якщо для систем, наведених на рис. 2, мають місце рівності критеріїв подібності:

$$P_1/P_2 = idem; P_3/P_2 = idem,$$

та

$$k_{P1}/k_{P2} = 1; k_{P3}/k_{P2} = 1,$$

тоді

$$P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = k_{P1}P_{2M} + k_{P2}P_{2M} - k_{P3}P_{3M},$$

або

$$P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = P_{1M} + P_{2M} - P_{3M},$$

що вказує на подібність розглянутих об'єктів.

З умов однозначності при $t=0$, $P=P_0$, $U=U_0$, $t=t_1$, $P=P_1$, $U=U_1$, слідує критерії-симплекси $P_0/P=idem$, $U_0/U=idem$.

Для створення моделі, в якій процес протікав би подібно до процесу в оригіналі, необхідно: 1) вибрати параметри моделі з умов теорії подібності і забезпечити тотожність рівнянь природи і моделі, що досягається при рівності визначальних критеріїв подібності; 2) додати до визначальних критеріїв подібності подібні для природи і моделі граничні і початкові умови. Перехід від параметрів, встановлених в процесі моделювання, до параметрів оригіналу в порядку прогнозування поведінки оригіналу здійснюють простим перерахуванням за формулами:

$$P_{1H} = k_{P1}P_{2M}; P_{2H} = k_{P2}P_{2M}; P_{3H} = k_{P3}P_{3M},$$

де k_{P1}, k_{P2} та k_{P3} – відповідні масштаби величин;

P_{1M}, P_{2M}, P_{3M} – величини, що характеризують процеси, зафіксовані при моделюванні.

Для подібності явищ необхідно, щоб вони описувалися однаковими математичними залежностями. Однак ця умова не є достатнім. При різних крайових умовах результати рішення одного і того ж рівняння виявляються неоднаковими. Умови однозначності повинні бути аналогічними в моделі і оригіналі. Відрізнятися вони можуть лише чисельними значеннями величин.

РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Поняття фізичної величини та її одиниці вимірювання

Предмети і явища навколишнього світу характеризуються різними властивостями, які можуть проявлятися в більшій чи меншій мірі і, отже, можуть бути кількісно оцінені. Для кількісного опису різних властивостей процесів і фізичних тіл застосовується поняття фізичної величини.

Під *фізичною величиною* розуміють одну з властивостей фізичного об'єкта (фізичної системи, явища або процесу), загальне в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальне для кожного з них. Так, усі тіла мають масу, температуру, але для кожного з них ці властивості різні. Те ж саме можна сказати і про інші величини – електропровідність, міцність, потік випромінювання тощо.

Зазвичай, говорячи про вимірювання, мають на увазі вимірювання фізичних величин, тобто величин, властивих матеріальному світу. Ці величини вивчають у природничих та технічних науках (фізиці, хімії, біології, електротехніці, теплотехніці і ін.), вони є об'єктом контролю та управління на виробництві (в металургії, машинобудуванні, приладобудуванні та ін.). Наприклад, об'єктом вимірювань може бути діаметр вала, кількість продукту, швидкість течії рідини по трубопроводу, вміст легуючих компонентів в сплаві, температура розплаву і т.д. Для більш детального вивчення фізичних величин їх класифікують на групи (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Класифікація фізичних величин

1. *За приналежністю до різних груп фізичних явищ* фізичні величини діляться на просторово-часові, механічні, теплові, електричні та магнітні, акустичні, світлові, фізико-хімічні та ін.

2. *За ступенем умовної незалежності від інших величин* фізичні величини поділяють на основні та похідні. В даний час в Міжнародній системі одиниць використовують сім величин, вибраних в якості основних (незалежних одна від іншої): довжина, час, маса, температура, сила електричного струму, кількість речовини і сила світла. Решта величини, такі як густина, сила, енергія, потужність та інші є похідними (тобто залежними від інших величин).

3. *За наявністю розмірності* фізичні величини ділять на розмірні, тобто мають розмірність і безрозмірні.

Розмір фізичної величини характеризує кількісний вміст властивості в кожному об'єкті. *Значення* фізичної величини – визначає розмір у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць вимірювань. Наприклад 0,001 км; 1 м; 100 см; 1000 мм – чотири варіанти представлення одного і того ж розміру величини, у даному випадку довжини.

Числове значення фізичної величини – це число, що виражає відношення значення величини до відповідної одиниці вимірювання.

Одиниця вимірювання являє собою величину фіксованого розміру, якій умовно присвоєно числове значення, що дорівнює 1, і застосовуване для кількісного вираження однорідних з нею фізичних величин. Одиниця вимірювання може належати будь-якій системі одиниць або бути позасистемною чи умовною.

Очевидно, що числове значення величини безпосередньо залежить від обраної одиниці вимірювання. Одиниці однієї і тієї ж величини можуть відрізнятися за своїм розміром, наприклад метр, фут і дюйм, будучи одиницями довжини, мають різний розмір: 1 фут = 0,3048 м, 1 дюйм = 0,0254 м.

Таким чином, для того щоб виміряти яку-небудь фізичну величину, тобто визначити її значення, необхідно зіставити (порівняти) її з одиницею вимірювання цієї величини, і визначити, у скільки разів вона більша чи менша одиниці вимірювання. У даний час встановлено наступне визначення процесу вимірювання: *вимірювання – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Усякий раз, коли ведуть вимірювання, знаходять яку частину одиниці або ціле число одиниць складає вимірювана величина.*

Іншими словами, вимірювання є фізичним експериментом, проведеним за допомогою засобів вимірювань. Без фізичного експерименту немає і вимірювання. Засновник російської метрології Д. І. Менделєєв писав: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять; точная наука не мыслима без меры». Визначення поняття «вимірювання», дане видатним філософом П. А. Флоренським («Техническая энциклопедия» 1931 р.): «Измерение – основной познавательный процесс науки и техники, посредством которого неизвестная величина количественно сравнивается с другою, однородною с нею и считаемою известной».

Отже, якщо є деяка фізична величина Q , прийнята для неї одиниця вимірювання, що дорівнює $[Q]$, то значення фізичної величини

$$Q = q \cdot [Q], \quad (2.1)$$

де q – числове значення величини Q .

Рівняння (1.1) називають *основним рівнянням вимірювань*, оскільки воно описує вимірювання як процес порівняння фізичної величини з її одиницею вимірювання. Вираз $q \cdot [Q]$ – є *результат вимірювання*, він складений з двох частин: числового значення q , яке є відношенням вимірюваної величини до одиниці вимірювання (воно може бути цілим або дробовим), та одиниці вимірювання $[Q]$. Зазвичай одиницю фізичної величини зберігає технічний пристрій – засіб вимірювання, що використовується для вимірювання.

Розглянемо ситуацію, коли при вимірюванні довжини деталі отримали результат вимірювання 101,6 мм. У цьому випадку за одиницю довжини прийнятий [1 мм], числове значення $q = 101,6$. Якщо ж за одиницю прийняти [1 см], то $q = 10,16$, якщо в якості одиниці використовувати [1 дюйм], то $q = 40$.

Для вимірювання фізичної величини можуть бути обрані різні одиниці, тобто

$$Q = q_1 \cdot [Q]_1 = q_2 \cdot [Q]_2. \quad (2.2)$$

З цього виразу випливає, що числове значення величини обернено пропорційно розміру одиниці: чим більший розмір одиниці, тим менше числове значення величини, і навпаки:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{[Q]_1}{[Q]_2}. \quad (2.3)$$

Крім того, співвідношення (1.2) показує, що розмір фізичної величини Q не залежить від вибору одиниці вимірювання.

Таким чином, числові значення вимірюваних величин залежать від того, які використовуються одиниці вимірювання. Вибір одиниць має велике значення для забезпечення порівнянності результатів вимірювань; допустити свавілля у виборі одиниць – означає порушити єдність вимірювань. Саме тому в більшості країн світу розміри одиниць вимірювань закріплені законодавчо. В Україні відповідно до Закону «Про забезпечення єдності вимірювань» допускаються до застосування одиниці Міжнародної системи одиниць.

Одиниця вимірювання – це деяка модель, відповідно до якої певний розмір фізичної величини прийнятий за одиницю відповідно до угоди і встановлений законом. Крім того, ця модель реалізована в засобі вимірювання, яке її зберігає і передає всім іншим, що використовують дану одиницю, засобам вимірювань. Такий процес формування, зберігання і використання одиниць фізичних величин склався в останні два століття.

Вимірювання значуще лише тоді, коли за його результатом можна оцінити істинне значення величини. При аналізі вимірювань слід чітко розрізняти ці два поняття: істинне значення фізичної величини та його емпіричний прояв – результат вимірювання.

Будь-який результат вимірювань містить похибку внаслідок недосконалості засобів і методів вимірювань, впливи зовнішніх умов та інших причин. Істинне значення вимірюваної величини залишається невідомим. Його можна представити лише теоретично. Результат вимірювання величини лише в більшій чи меншій мірі наближається до її істинного значення, тобто представляє його оцінку. Детальніше це розглядатиметься при вивченні «Похибки вимірювань».

2.2. Шкали вимірювань

Шкала вимірювання є вихідною основою для вимірювань даної величини. Вона являє собою впорядковану сукупність значень величини.

Практична діяльність призвела до формування різних видів шкал вимірювань фізичних величин, основними з яких є чотири.

1. **Шкала порядку (рангів)** являє собою ранжований ряд – впорядковану за зростанням або спаданням послідовність величин, що характеризують досліджувану властивість. Вона дозволяє встановити відношення порядку за зростанням або спаданням величин, але немає можливості оцінки, у скільки разів (або на скільки) більша або менша одна величина в порівнянні з іншою. У шкалах порядку в низці випадків може існувати нуль (нульова відмітка), принциповим для них є відсутність одиниці вимірювань, тому що її розмір неможливо встановити, в цих шкалах над величинами не можна проводити математичні операції (множення, сумування).

Прикладом шкали порядку є шкала Мооса для визначення твердості тіл. Це шкала з реперними точками, яка містить 10 опорних (реперних) мінералів з різними умовними числами твердості. Прикладами таких шкал також є шкала Бофорта для вимірювання сили (швидкості) вітру і шкала землетрусів Ріхтера (сейсмічна шкала).

2. **Шкала інтервалів (різниць)** відрізняється від шкали порядку тим, що для вимірюваних величин запроваджуються не лише відношення порядку, а й сумування інтервалів (різниць) між різними кількісними проявами властивостей. Шкали різниць можуть мати узгоджені умовні нулі-репери та одиниці вимірювань. За шкалою інтервалів можна визначити, на скільки одна величина більша чи менша іншої, але не можна сказати у скільки разів. За шкалами інтервалів вимірюють час, відстань (якщо невідомо початок шляху), температуру за Цельсієм і т.д.

Шкали інтервалів є більш досконалими, ніж шкали порядку. У цих шкалах над величинами можна проводити адитивні математичні операції (додавання і віднімання), але не можна – мультиплікативні (множення і ділення).

3. **Шкала відношень** описує властивості величин, для яких можна застосувати відношення порядку, сумування інтервалів і пропорційності. У цих шкалах існує природний нуль і за узгодженням встановлюють одиницю вимірювань. Шкала відношень служить для представлення результатів вимірювань, отриманих

відповідно до основного рівняння вимірювань (1.1) шляхом експериментального порівняння невідомої величини Q з її одиницею $[Q]$. Прикладами шкали відношень є шкала маси, довжини, швидкості, термодинамічної температури.

Шкала відношень є найдосконалішою і найбільш поширеною з усіх вимірювальних шкал. Це єдина шкала, за якою можна встановити значення вимірюваного розміру. На шкалі відношень визначені будь-які математичні операції, що і дозволяє вносити в показники, нанесені на шкалу, мультиплікативні і адитивні поправки.

4. **Абсолютна шкала** має всі ознаки шкали відношень, але додатково в ній існує природне однозначне визначення одиниці вимірювань. Такі шкали використовують для вимірювань відносних величин (коефіцієнти підсилення, ослаблення, корисної дії, відбивання, поглинання, амплітудної модуляції і т.д.). Низці таких шкал притаманні межі, укладені між нулем і одиницею.

Шкали інтервалів і відношень об'єднують терміном «метричні шкали». Шкалу порядку відносять до умовних шкал, тобто до шкал, в яких не визначена одиниця вимірювання й іноді називають неметричною. Абсолютні та метричні шкали відносять до розряду лінійних. Практична реалізація шкал вимірювань здійснюється шляхом стандартизації як самих шкал і одиниць вимірювань, так і, в необхідних випадках, методів і умов їх однозначного відтворення.

2.3. Системи одиниць фізичних величин

З моменту проведення вимірювань, велике значення набули вибір одиниць та забезпечення порівняння їх результатів. Числові значення вимірюваних величин залежать від того, які одиниці вимірювання використовуються. Початково використовувані одиниці довжини, наприклад, визначали за розмірами частин тіла людини (фут, дюйм, лікоть, туаз, сажень, аршин), тому вони були індивідуальними і непостійними. Довільність вибору розмірів одиниць привела до появи безлічі місцевих одиниць.

Наявність великої кількості довільних одиниць для однієї і тієї ж величини (наприклад, відстань – верстами, милями) ускладнювало порівняння результатів вимірювань, зроблених різними спостерігачами, що спричиняло незручності та труднощі, відбивалося на розвитку торгівлі і промисловості. З метою уніфікувати одиниці вимірювання, зробити їх незалежними від часу і різного роду випадковостей у Франції була розроблена *метрична система мір* – перша в історії система одиниць фізичних величин (1791 р.). Ця система будувалася на основі природної одиниці довжини, яка дорівнює одній десятимільйонній частини чверті меридіана, що проходить через Париж. Ця одиниця отримала назву «метр» (звідси назва системи – метрична). За одиницю маси взято масу одного кубічного дециметра дистильованої води при температурі її найбільшої густини (+4 °C) і названа «кілограм». Були виготовлені платиновий прототип метра у вигляді лінійки шириною 25 мм, товщиною близько 4 мм з відстанню між кінцями 1 м і прототип кілограма у вигляді циліндра.

Крім одиниць довжини і маси, метрична система (1791 р.) включала в себе одиниці площі, об'єму і місткості для рідин та сипучих тіл. Також при запровадженні метричної системи була прийнята десяткова система утворення кратних і часткових одиниць. Незважаючи на очевидні переваги, метрична система мір впроваджувалася з великими труднощами. Лише в грудні 1840 р. метрична система одиниць була законодавчо встановлено у Франції, пізніше це було зроблено в Німеччині та інших країнах.

У 1832 р німецький вчений К. Гаусс запропонував метод побудови систем одиниць вимірювань, що використовується і в даний час. В основі його методу, одиниці деяких величин (*основні* одиниці) встановлюють довільно і незалежно одна від іншої, інших (*похідні* одиниці) – виражають через основні одиниці, виходячи з рівнянь зв'язку вимірюваних величин з основними. Рівняння зв'язку – рівняння, що відображає зв'язок між величинами, зумовлений законами природи, в яких під літерними символами розуміють фізичні величини (наприклад, рівняння $v = l/t$ відображає існуючу залежність швидкості v від шляху l і часу t).

Сукупність основних і похідних одиниць вимірювання називається *системою одиниць фізичних величин*. Основні одиниці відтворені з великою точністю у вигляді речовинного зразка (еталона) або за допомогою відтворюваних явищ природи, на яких засновано визначення одиниці. Гаусс розробив систему одиниць, названу ним абсолютною, у якій в якості основних прийняті три одиниці: довжини – міліметр, маси – міліграм і часу – секунда. Всі інші одиниці (похідні) можна визначити за допомогою цих трьох.

З розвитком науки і техніки метричну систему стали доповнювати одиницями інших величин, але одиниці вибирали довільно, непов'язуючи з іншими галузями. Це призвело до запровадження в практику декількох одиниць для однієї і тієї ж за своєю фізичною природою величини (наприклад одиниці тиску і механічної напруги, роботи та енергії) та створювало незручності в застосуванні одиниць. З'явилась низка інших систем одиниць фізичних величин, побудованих за принципом, запропонованим Гауссом, що базуються на метричній системі мір, але відрізняються один від одного основними одиницями. Наприклад, система СГС, в якій основними одиницями є сантиметр, грам і секунда; система МКГСС з трьома основними одиницями: метр, кілограм-сила (одиниця сили) і секунда; система МКСА з основними одиницями метр, кілограм, секунда і ампер.

Наявність низки систем одиниць фізичних величин, значної кількості позасистемних одиниць, а також незручності, пов'язані з перерахунком при переході від однієї системи одиниць до іншої, вимагало уніфікації одиниць вимірювань. Зростання науково-технічних та економічних зв'язків між різними країнами обумовлювало необхідність такої уніфікації в міжнародному масштабі. У 1960 р XI Генеральна конференція з мір та ваг затвердила Міжнародну систему одиниць, що позначається скорочено SI (System International), в українській транскрипції – СІ (Система Інтернаціональна).

2.4. Міжнародна система одиниць фізичних величин

Прийняття Міжнародної системи одиниць (СІ) в 1960 р. стало важливим прогресивним актом, який підсумував велику багаторічну роботу в напрямку уніфікації одиниць величин, узагальнив досвід роботи науково-технічних кіл різних країн і міжнародних організацій з метрології, стандартизації, фізики та електротехніки. На сьогодні ця система прийнята на законодавчому рівні більше ніж в 124 країнах світу. У результаті деяких видозмін, прийнятими Генеральними конференціями з мір та ваг, в даний час система включає сім основних і низка похідних одиниць величин.

Основними перевагами СІ є:

- універсальність – охоплення нею всіх областей науки і техніки;
- уніфікація одиниць для всіх областей і видів вимірювань (механічних, теплових, світлових, електричних і т.д.), наприклад, застосовується єдина одиниця тиску – паскаль замість низки одиниць тиску (атмосфера, міліметр ртутного стовпа, міліметр водяного стовпа, бар, п'єза, дина на квадратний сантиметр та інші);
- когерентність (зв'язність, узгодженість) системи – всі похідні одиниці виходять з рівнянь зв'язку між величинами, у яких коефіцієнти дорівнюють одиниці;
- можливість відтворення одиниць з високою точністю відповідно до їх визначення;
- спрощення запису рівнянь і формул у фізиці, хімії, а також в технічних розрахунках у зв'язку з відсутністю перевідних коефіцієнтів;
- зменшення кількості допустимих одиниць;
- єдина система утворення кратних і часткових одиниць, що мають власну назву;
- полегшення процесу навчання;
- краще взаєморозуміння при подальшому розвитку науково-технічних та економічних зв'язків між країнами.

2.4.1. Основні одиниці СІ.

Основною одиницею величини називається одиниця фізичної величини, тобто величини, яка умовно прийнята в якості незалежної від інших величин системи. При виборі основних одиниць СІ виходили з того, щоб:

- 1) охопити системою всі галузі науки і техніки;
- 2) створити основу утворення похідних одиниць для різних фізичних величин;
- 3) прийняти зручні для практики розміри основних одиниць, що вже одержали широке розповсюдження;
- 4) вибрати одиниці таких величин, відтворення яких за допомогою еталонів можливо з найбільшою точністю.

Основні одиниці СІ із зазначенням скорочених позначень українськими і латинськими буквами наведені в табл. 2.1.

Основні одиниці СІ

Величина	Одиниця вимірювання	Скорочене позначення одиниці		Розмірність
		українське	міжнародне	
Довжина	метр	м	m	L
Маса	кілограм	кг	kg	M
Час	секунда	с	s	T
Сила електричного струму	ампер	A	A	I
Термодинамічна температура	кельвін	K	K	Θ
Сила світла	кандела	кд	cd	J
Кількість речовини	моль	моль	mol	N

Визначення основних одиниць, що відповідають рішенням Генеральної конференції з мір та ваг, наступні.

Метр є довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за проміжок часу, що дорівнює $1/299\,792\,458$ секунди.

Кілограм є одиницею маси і дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

Секунда дорівнює $9\,192\,631\,770$ періодам випромінювання, яке відповідає переходові між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Ампер дорівнює силі незмінного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і нехтуюче малої площі поперечного перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає би на кожній ділянці завдовжки 1 м силу взаємодії 2×10^{-7} Н.

Кельвін дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води.

Моль дорівнює кількості речовини системи, яка вміщує стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг.

Кандела дорівнює силі світла у заданому напрямі джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого у цьому напрямку становить $1/683$ Вт/ср.

Три перші одиниці СІ (метр, кілограм і секунда) дозволяють утворити похідні одиниці для вимірювання механічних і акустичних величин. При додаванні до них одиниці температури (Кельвіна) можна утворити похідні одиниці для вимірювань теплових величин.

Метр, кілограм, секунда і ампер є основою для утворення похідних одиниць в області електричних, магнітних вимірювань і вимірювань іонізуючих випромінювань, а моль використовують для утворення одиниць в галузі фізико-хімічних вимірювань.

2.4.2. Похідні одиниці СІ.

Похідні одиниці Міжнародної системи одиниць утворюються з основних за допомогою рівнянь зв'язку між величинами, у яких числові коефіцієнти дорівнюють одиниці. Наприклад, для встановлення одиниці лінійної швидкості v слід скористатися рівнянням рівномірного прямолінійного руху

$$v = \frac{l}{t}$$

де l – довжина пройденого шляху (в метрах);
 t – час (в секундах).

Отже, одиниця швидкості СІ – метр за секунду – це швидкість точки, при якій вона за час 1 с переміщується на відстань 1 м, рухаючись прямолінійно і рівномірно.

Похідним одиницям зазвичай присвоюють назви на честь відомих вчених. Так, одиниці тиску 1 Н/м^2 – паскаль (Па) на ім'я французького математика і фізика Блеза Паскаля. Похідні одиниці, що мають спеціальні назви, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Похідні одиниці СІ, що мають спеціальні назви

Величина		Одиниця		
Назва	Розмірність	Назва	Позначення	Відтворення через одиниці СІ
Частота	T^{-1}	герц	Гц	s^{-1}
Сила, вага	$LM T^{-2}$	ньютон	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Тиск, механічна напруга	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Енергія, робота, кількість теплоти	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Потужність	$L^2 M T^{-3}$	ват	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Кількість електрики	TI	кулон	Кл	$s \cdot A$
Електрична напруга, потенціал	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Електричний опір	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сіменс	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Потік магнітної індукції	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генрі	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Активність радіонукліда	T^{-1}	бекерель	Бк	s^{-1}
Поглинута доза випромінювання	$L^2 T^{-2}$	грей	Гр	$m^2 s^{-2}$
Еквівалентна доза випромінювання	$L^2 T^{-2}$	зіверт	Зв	$m^2 \cdot s^{-2}$

Для вимірювань плоского і тілесного кутів в СІ призначені радіан і стерадіан відповідно.

Радіан (рад) – одиниця плоского кута – це кут між двома радіусами кола, дуга між якими по довжині дорівнює радіусу. В градусному еквіваленті радіан дорівнює $57^{\circ}17'48''$.

Стерадіан (ср) – одиниця тілесного кута – це тілесний кут, вершина якого розташована в центрі сфери і який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, по довжині рівною радіусу сфери.

Радіан і стерадіан використовуються в основному для теоретичних розрахунків. На практиці вимірювання кутів проводять в кутових градусах (хвилинах, секундах). Саме в цих одиницях проградуировані більшість кутомірних засобів вимірювань.

2.4.3. Розмірність фізичної величини.

Розмірність є однією із найважливіших якісних характеристик фізичної величини. *Розмірність* є вираженням у формі степеневого одночлена, складеного з добутків символів основних величин в різних степенях і відображає зв'язок даної фізичної величини Q з фізичними величинами, прийнятими в даній системі за основні з коефіцієнтом пропорційності, що дорівнює 1. Розмірність (англ. dimension) позначають знаком \dim :

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\varphi} N^{\eta} J^{\mu}, \quad (2.4)$$

де L, M, T, I, Θ, N, J – розмірності основних фізичних величин СІ, які прийнято позначати відповідними прописними буквами (див. табл. 1.1), α, β, γ – показники степеня, які залежно від рівняння, що зв'язує величини, можуть бути додатними або від'ємними, цілими або дробовими, а також дорівнювати нулю.

Таким чином, розмірність – це символічне (буквене) позначення залежності похідної величини від основних величин. Розмірність дає уяву про вид величини, є її якісною характеристикою, а розмір визначає кількісний вміст величини – кількісна характеристика.

Приклади розмірностей деяких величин.

Площа S дорівнює другій степені довжини, тобто $S = l^2$ і не залежить від інших величин, тому її розмірність:

$$\dim S = L \cdot L = L^2.$$

Швидкість v прямопропорційна відстані і оберненопропорційна часу, тобто $v = l/t$, її розмірність:

$$\dim v = L \cdot T^{-1}.$$

Аналогічно, розмірність тиску:

$$\dim P = \dim\left(\frac{F}{S}\right) = \dim\left(\frac{m \cdot a}{l^2}\right) = L^{-1}MT^{-2},$$

розмірність енергії:

$$\dim E = \dim\left(\frac{mv^2}{2}\right) = L^2MT^{-2}.$$

Якщо всі показники степеня у формулі (1.4) дорівнюють нулю ($\dim Q = 1$), то таку величину називають безрозмірною (наприклад, відносне видовження).

У розмірностях проявляється деякий зв'язок між величинами, однак вони не є вичерпними характеристиками величин, так як зустрічаються різні за фізичною природою величини, що мають однакові розмірності. Прикладами таких величин є робота і момент сили, сила струму і магніторушійна сила та ін. Однак поняття про розмірності досить корисне при перевірці правильності складних розрахункових формул і для з'ясування залежності між величинами (аналіз розмірностей).

2.4.4. Позасистемні одиниці вимірювання.

Міжнародна система одиниць і самі одиниці склалися століттями, при цьому виникали певні традиції і звички. Так, на всіх морських судах швидкість руху вимірюють у вузлах (1 вузол дорівнює 1 морській милі на годину), для вимірювання місткості нафти в США застосовується барель (1 барель = $158,988 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$), здавна виникла одиниця тиску – атмосфера. Існує багато одиниць, що не входять в Міжнародну систему та інші системи одиниць, але широко використовуються в науці, техніці, побуті. Такі одиниці називають *позасистемними*. Відповідно *системними* називають одиниці, що входять до однієї з прийнятих систем.

Відповідно до ДСТУ 8.417 позасистемні одиниці поділяють на чотири види по відношенню до системних:

1) допустимі до застосування нарівні з одиницями СІ, наприклад: одиниця маси – тона; плоского кута – градус, хвилина, секунда; об'єму – літр; часу – хвилина, година, доба та ін.;

2) допустимі до застосування в спеціальних областях, наприклад: астрономічна одиниця, парсек, світловий рік – одиниці довжини в астрономії; діоптрій – одиниця оптичної сили в оптиці; електрон-вольт – одиниця енергії в фізиці; кіловат-годину – одиниця енергії для лічильників; гектар – одиниця площі в сільському і лісовому господарстві та ін.;

3) тимчасово допустимі до застосування нарівні з одиницями СІ, наприклад: морська миля, вузол – у морській навігації; карат – одиниця маси в ювелірній справі; бар – одиниця тиску в фізиці та ін. Ці одиниці поступово повинні вилучатися із використання відповідно до міжнародних угод;

4) вилучені з використання (тобто при нових розробках застосування цих одиниць не рекомендується), наприклад: міліметр ртутного стовпа, кілограм-сила на

квадратний сантиметр – одиниці тиску; ангстрем, мікрон – одиниці довжини; ар – одиниця площі; центнер – одиниця маси; кінська сила – одиниця потужності; калорія – одиниця кількості теплоти і ін.

2.4.5. Кратні та часткові одиниці.

Розрізняють кратні та часткові одиниці величин. *Кратна одиниця* – це одиниця фізичної величини, в ціле число разів перевищує системну або позасистемну одиницю. Наприклад, одиниця довжини кілометр дорівнює 10^3 м, тобто кратна метру. *Частинна одиниця* – одиниця фізичної величини, значення якої в ціле число разів менше системної або позасистемної одиниці. Наприклад, одиниця довжини міліметр дорівнює 10^{-3} м, тобто є частинною.

Для зручності застосування одиниць фізичних величин СІ прийняті приставки для утворення найменувань десяткових кратних і частинних одиниць, табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Множники та приставки для утворення десяткових кратних і часткових одиниць та їх найменування

Множник	Приставка	Позначення приставки	
		українське	міжнародне
10^{24}	йота	Й	Y
10^{21}	зета	З	Z
10^{18}	екса	Е	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гіга	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кіло	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	мілі	м	m
10^{-6}	мікро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	піко	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	ато	а	a
10^{-21}	зепто	з	z
10^{-24}	иокто	й	y

Відповідно до міжнародних правил кратні та часткові одиниці площі та об'єму слід утворювати, приєднуючи приставки до вихідних одиниць. Таким чином, степені відносяться до тих одиниць, які отримані в результаті приєднання приставок. Наприклад, $1 \text{ км}^2 = 1 (\text{км})^2 = (10^3 \text{ м})^2 = 10^6 \text{ м}^2$.

2.4.6. Правила написання позначень одиниць.

Найменування, позначення і правила написання одиниць величин, а також правила їх застосування на території України встановлює Уряд України. Характеристики і параметри продукції, що постачається на експорт, можуть бути виражені в інших одиницях вимірювання, встановлених споживачем.

Основні правила, якими слід керуватися при написанні позначень одиниць.

1. Позначення одиниць розміщують за числовими значеннями величин і в рядок з ними (без переносу на наступний рядок). В позначеннях крапку як знак скорочення не ставлять, наприклад:

10 км (а не 10 км.), 2 с (а не 2 с.).

2. Між останньою цифрою числа та позначенням одиниці залишають пропуск (пробіл), наприклад:

20 °С (а не 20°С або 20° С), 99 % (а не 99%), 220 В (а не 220В).

Винятки становлять позначення у вигляді знака, піднятого над рядком, перед якими пропуск (пробіл) не залишають, наприклад:

20°10'35''.

3. При вказуванні значень величин з граничними відхиленнями числові значення з граничними відхиленнями розміщують в дужках і позначення одиниць – за дужками або проставляють позначення одиниці за числовим значенням і її граничним відхиленням, наприклад:

20,0 кг ±0,1 кг або (5,5±0,2) г.

4. Позначення одиниць поруч з формулами, що виражають залежності між величинами, не допускається (тобто пояснення позначень величин до формул даються нижче), наприклад:

$$v = 3,6 \frac{S}{t},$$

де v – швидкість, км/год;

S – шлях, км;

t – час, год.

5. Буквені позначення одиниць, що входять у добуток, розділяються крапками на середній лінії, наприклад:

Н·м; с·А; Па·с (а не Нм; с×А; Па с).

6. У позначення одиниць, утворених діленням, застосовується одна горизонтальна або коса риска, наприклад:

$$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ або } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Допускається також запис $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

7. Позначення одиниць, назви яких утворені за прізвищами вчених, слід писати з великої (заголовної) літери, наприклад:

220 В, 25 мА, 50 Гц, 10^{-12} Гр.

Більш повний перелік правил написання позначень одиниць приведений в ДСТУ 8.417.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ В ДОСЛІДЖЕННІ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ, БУДІВЕЛЬНИХ, ДОРОЖНИХ, МЕЛІОРАТИВНИХ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ

3.1 Розробка математичних моделей у дослідження підйомно-транспортної машини

Особливості будівництва математичних моделей

Модель – об'єкт-замінник, що у визначених умовах може замінити об'єкт-оригінал, відтворюючи властивості і характеристики оригіналу, які мають переваги (наглядність, легкість, доступність іспитів). Модель є цільовим відображенням (тобто модель відображає не сам об'єкт-оригінал, а те, що в ньому нас цікавить, тобто те, що відповідає поставленій меті).

Заміщення об'єкта A_1 на об'єкт A_2 проводиться для вивчення або фіксації найважливіших властивостей об'єкта A_1 через об'єкт A_2 . Об'єкт, що заміщається, називається оригіналом або натурою, що заміщає – моделлю.

Приклад

При створенні проекту теплохода потрібно установити залежність лобового опору, який він буде випробувати під час руху в залежності від швидкості ходу. Розрахувати цю залежність аналітично важко. Питання вирішується створенням геометрично подібної моделі менших розмірів і її іспитом в аеродинамічній трубці. Заміщення оригіналу моделлю забезпечує в цьому випадку фіксацію існуючих властивостей оригіналу і можливість його дослідження.

Процес моделювання складається з декількох етапів:

- 1) постановка задачі і визначення властивостей оригіналу, що підлягає дослідженню;
- 2) констатація важкості або неможливості дослідження оригіналу;
- 3) вибір моделі, що досить добре фіксує істотні властивості оригіналу і легко піддається дослідженню;
- 4) дослідження моделі відповідно до поставленої задачі;
- 5) перенос результатів дослідження моделі на оригінал;
- 6) перевірка результатів.

Зокрема, як замісники оригіналів моделі використовуються як засіб спілкування людей, засоби осмислення і пізнання явищ матеріального світу, засоби навчання і тренування.

Математична модель – сукупність математичних об'єктів (чисел, символів, і т.д.) і зв'язків між ними, що відтворюють найважливіші для проектування властивості проектувального об'єкта.

Математична модель як проекція реальних об'єктів характеризується рядом особливостей. Модель можна розглядати як засіб вивчення реальної системи

шляхом її заміни більш зручною для експериментального дослідження системою, зберігаючи істотні риси оригіналу.

Модель називають ізоморфною (однакова за формою), якщо між нею і реальною системою існує повна відповідність, і гомоморфною, якщо існує відповідність лише між найбільш значними складовими частинами об'єкта і моделі.

Математичне моделювання включає наступні етапи: дослідження об'єкта й складання його математичного опису; побудова алгоритму, що моделює поведінку об'єкта; перевірку адекватності моделюючого об'єкта; використання моделі.

Математичний опис складається на основі законів фізики, хімії й ін., які характеризують динаміку і статику процесів у досліджуваному об'єкті і виражається мовою будь-яких розділів математики.

3.2 Класифікація математичних моделей

Для визначення виду моделі користуються наступними позначеннями:

- перша буква: *Д* - детермінована, *З* - стохастична;
- друга буква: *Б* - безперервна, *Д* - дискретна;
- третя буква: *А* - аналітична, *І* - імітаційна.

За принципами побудови моделі розподіляються на аналітичні й імітаційні. Аналітичні моделі дозволяють одержувати явні функціональні залежності для шуканих величин і визначати чисельні рішення для конкретних початкових умов і кількісні характеристики моделі. Для складного об'єкта - побудова аналітичної моделі майже неможлива. Для таких складних об'єктів застосовуються імітаційні моделі, що імітують поведінку реальних об'єктів.

Особливості функціонування об'єктів моделювання і вигляд використовованого математичного опису визначає безперервний або дискретний характер моделі, а цілі проектування - детермінований або стохастичний підхід до побудови моделі.

Моделі поділяються на пізнавальні й прагматичні (це відповідає розподілу цілей на теоретичні й практичні).

Пізнавальні моделі є формою організації і подання знань, засобом з'єднання нових знань з наявними.

Прагматичні моделі – засіб керування способом організації практичних дій, способом подання дій або їхнього результату, тобто є робочим поданням цілей.

Розходження між ними:

- а) пізнавальні моделі відбивають існуюче;
- б) прагматичні - не існуюче, бажане.

Моделі поділяються на статичні й динамічні.

Статичні - моделі конкретного стану об'єкта.

Динамічні відображають процес зміни стану.

З Моделі поділяються на абстрактні (ідеальні) і матеріальні (реальні).

Абстрактні – ідеальні конструкції, побудовані засобами мислення і свідомості.

Реальні – моделі, побудовані з реальних об'єктів.

Подібні моделі – які забезпечують перенос даних на оригінал на підставі подоби.

Подоба – це повна математична аналогія при наявності пропорційності між східними перемінними, що незмінно зберігається при всіх можливих значеннях цих перемінних, задовольняючи східним рівнянням.

Різноманітна форма опису конкретного об'єкта:

- функція, що виражає перемінну через її аргумент $y = f(x_i)$;
- кінцеве рівняння $F(y, x_i) = 0; i = 1, 2, 3, \dots, n$;
- диференціальне рівняння $F(y, x_i, t, D) = 0$.

Два об'єкти подібні, коли:

- вони мають східні математичні описи:

$$F(y_1, x_{2i}, t_{1j}, D_{1j}, A_{15}) = 0;$$

$$F(y_2, x_{2i}, t_{2j}, D_{2j}, A_{25}) = 0,$$

- східні перемінні, що утримуються в математичних описах, зв'язані коефіцієнтом пропорційності, що називається масштабом або константою подоби:

$$m_y = y_1 / y_2; m_{x_i} = x_{1i} / x_{2i}; m_{t_j} = t_{1j} / t_{2j}.$$

Геометрична подоба – це подоба геометричних образів: точок, ліній, поверхонь, фігур, тіл.

Фізична подоба – подоба фізично однорідних об'єктів.

Тимчасова подоба – подоба функцій часу.

Подоба реальних моделей і оригіналів може бути прямою, непрямою (установлюється не в результаті фізичної взаємодії, умовно).

Модель кінцева, тому що:

- вона відображає оригінал лише у кінцевому числі відносин;
- ресурси моделювання кінцеві.

Модель завжди спрощено відображає оригінал.

Спрощеність характеризує якісне розходження моделі й оригіналу.

Як і будь-які реальності, моделі перетерплюють зміни, проходять свій "життєвий цикл".

Моделювання є нероздільним сполученням науки і мистецтва.

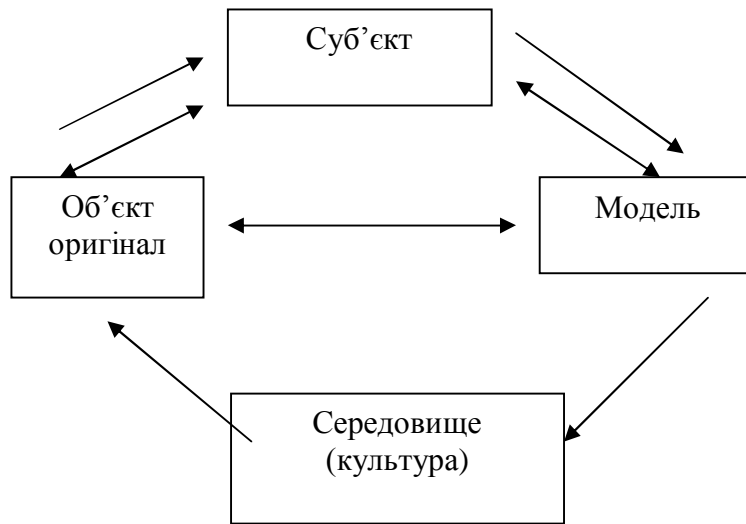


Рисунок 3.1 – Схема моделі

3.3 Ступеневі комплекси

Ступеневий комплекс – це функція вигляду

$$y = x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}.$$

Положення ступеневих комплексів:

- число простих ступеневих комплексів, утворене з деяких величин, не може перевершити числа цих величин;
- будь-яку функцію деяких величин можна подати у вигляді функції ступеневого комплексу цих величин. У будь-якому вираженні вигляду:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

-будь-яку функцію розмірних величин можна подати у вигляді розмірного ступеневого комплексу, що складається з цих величин, і безрозмірної функції цих же величин.

Для подоби ступеневих комплексів необхідні:

- їх східність;
- зв'язок східних перемінних масштабами;
- несуперечність рівнянь, виражених у масштабах східних перемінних.

3.4 Статистична обробка даних

При обробці результатів експериментів у вимірювальній техніці, автоматичі, статистичній радіотехніці виникає необхідність оцінки характеристик випадкових величин.

Як оцінку \bar{x} невідомого математичного очікування m_x випадкова величина X використовує середнє арифметичне результатів n незалежних іспитів:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

а для оцінки дисперсії δx^2 – співвідношення

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}.$$

Випадкова величина x розподіляється за нормальним законом з математичним очікуванням m_x і дисперсією δx^2 . Значення x знаходиться в інтервалі $(m_x - \Delta, m_x + \Delta)$ з довірчою імовірністю P .

3.5 Відповідність і відповідне моделювання

Будь-яке перетворення деякої перемінної v в іншу w можна символічно позначити оператором A й виразити w через v у виді $w = A(v)$. Зворотне перетворення w у v можна записати у вигляді $v = A^{-1}(w)$.

Визначення відповідностей, що забезпечують еквівалентність одного оператора послідовності декількох, викликає великий теоретичний і практичний інтерес. Фактично при цьому мова йде про можливість рішення складної задачі шляхом рішення декількох більш простих. У даний час, однак, загальної теорії відповідностей не існує. Методи зведення складних задач до декількох простих, відомі тільки для окремих випадків.

Відповідне моделювання – це заміщення оригіналу відповідною моделлю, тобто такою, значення перемінної якої зв'язані з відповідними значеннями перемінних оригіналу, визначеними нелінійними математичними залежностями. В окремому випадку відповідна модель представляє подібну.

Приклад

Існують два об'єкти, описувані рівняннями

$$y' + \left(a + v'/v\right)y = bx; \quad (3.1)$$

$$y_1' + \alpha y_1 = \beta x_1, \quad (3.2)$$

де a, b, α, β – позитивні постійні;

$$y = y(t), x = x(t),$$

$$v = v(t) > 0; \quad y_1 = y_1(t_1); x_1 = x_1(t_1); y(0) = y_1(0) = 0.$$

Подоба об'єктів неможлива, тому що рівняння (3.1) і (3.2) не є східними. Помножимо рівняння (3.1) на v :

$$vy' + avy + v'y = bvx, \quad (3.3)$$

і введемо нові перемінні $y_2 = y_2(t), x_2 = x_2(t)$;

$$y_2 = vy, y_2' = v'y + vy'; x_2 = vx. \quad (3.4)$$

На підставі цього рівняння (3.3) набуває вигляду:

$$y_2' + ay_2 = bx_2, \quad (3.5)$$

аналогічному (3.2), причому $y_2 = y_2(t), x_2 = x_2(t)$.

Зробимо рівняння (3.2) і (3.5) подібними. Для цього вводимо оператор

$$D = \frac{d}{dt}, \quad D = \frac{d}{dt_1}$$

і додаємо рівнянням безрозмірну форму:

$$1 + \frac{\alpha}{D_1} = \frac{\beta x_1}{D_1 y_1}, \quad 1 + \frac{a}{D} = \frac{bx_2}{Dy_2}.$$

Критерії подоби:

$$\Pi_{11} = \frac{\alpha}{D_1}, \quad \Pi_{12} = \frac{\beta x_1}{D_1 y_1}, \quad \Pi_{21} = \frac{\alpha}{D}, \quad \Pi_{22} = \frac{bx_2}{Dy_2}.$$

Масштабні рівняння:

$$\frac{P_{11}}{P_{22}} = \frac{\alpha}{aD_1/D} = \frac{\alpha}{am_t} = 1;$$

$$\frac{P_{12}}{P_{22}} = \frac{\beta x_1}{bx_2(D_1/D)(y_1/y_2)} = \frac{\beta m_x}{bm_t m_y} = 1.$$

Якщо масштаби $m_y = y_1/y_2$, $m_x = x_1/x_2$, $m_t = t/t_1 = D_1/D$ задовольняють цим рівнянням, то рівняння (3.2) та (3.5) подібні. У такому випадку згідно з рівняннями (3.4)

$$m_y = y_1/vy; \quad m_x = x_1/vx.$$

Рішення рівняння (3.2) при $x_1 = m_x vx$ дозволяє знайти рішення рівняння (3.1)

$$y = y_1/m_y v.$$

Об'єкт, описаний рівнянням (3.2), є в цих умовах відповідною моделлю об'єкта, описаного рівнянням (3.1).

3.6 Точність математичного моделювання

Говорити про точність моделювання можна тільки тоді, коли моделювання супроводжується виконанням тих або інших кількісних співвідношень. Це означає, що поняття точності моделювання відноситься тільки до математичного моделювання. Стосовно до нематематичних моделей це поняття втрачає зміст.

Похибки математичного моделювання викликають два фактори – неточність математичних залежностей (функцій, рівнянь) і неточність чисельних значень різних величин, зв'язаних цими залежностями.

Точність розрахункового моделювання зв'язана з поняттям апроксимації.

Апроксимація – це заміна значень різних величин і математичних виражень наближеними, звичайно більш простими.

У випадку наближеного вираження деякої функції $f(x)$ функцією $f_\alpha x \cong f(x)$ перша з них називається апроксимованою (що наближається), друга – апроксимуючою. Точність наближення характеризує похибку апроксимації.

$$\Delta f_\alpha = f_\alpha(x) - f(x) = \Delta f_\alpha(x).$$

Апроксимація рівняння $F(y, x_i, t_j, D) = 0$ рівнянням $F_a(y_a, x_i, t_j, D_j) = 0$ означає апроксимацію функції F та y функціями F_a та y_a . У цьому випадку точність апроксимації характеризується похибкою

$$\Delta y_\alpha = y_\alpha(x_i, t_j) - y(x_i, t_j) = \Delta y_\alpha(x_i; t_j).$$

Математичний опис будь-якого матеріального об'єкта завжди супроводжується деякою його ідеалізацією. Виникаюча при цьому погрішність реалізації являє собою похибку первинної апроксимації.

Аналогічно наближеній подобі визначається поняття наближеної відповідності.

Наближеним називається відповідність двох об'єктів, досягнута в результаті апроксимації математичного очікування одного з них.

При матеріальному математичному моделюванні крім апроксимації математичного опису оригіналу або моделі джерелами похибок служать різні відхилення реальних постійних і перемінних величин від їхніх ідеальних (номінальних) значень, обумовлене неточністю відтворення конкретних чисельних значень різних величин при моделюванні.

Дослідження оригіналу шляхом дослідження моделі являє собою визначення y_1 за x_{1i} обхідним шляхом, через x_{2i} й y_2 . За заданим значенням x_{1i} розраховують $x_{2i} = x_{1i} / m_{x_i}$. Ці значення відтворюються в моделі з погрішностями Δx_{2i} , що спотворюють значення y_2 . Замість необхідного значення $y_2 = f_2(x_{2i})$ буде мати місце

$$y_2 + \Delta y_{2mp} = f_2(x_{2i} + \Delta x_{2i}).$$

Значення $y_2 + \Delta y_{2mp}$ вимірюється з похибкою Δy_2 . Ще більш спотворене значення $y_2 + \Delta y_{2mp} + \Delta y_2$ перераховується в значення східної перемінної оригіналу:

$$y_1 + \Delta y_{1n} = m_y (y_2 + \Delta y_{2mp} + \Delta y_2) = m_y (y_2 + \Delta y_{2n}),$$

де $\Delta y_{2n} = \Delta y_{2mp} + \Delta y_2$,

$\Delta y_{1n} = m_y \Delta y_{2n} = m_y (\Delta y_{2mp} + \Delta y_2)$ – повні похибки моделі й оригіналу відповідно.

Складові похибки моделі Δy_{2mp} знаходяться зі співвідношення

$$y_2 + \Delta y_{2mp} = f_2(x_{2i} + \Delta x_{2i}) = f_2(x_{2i}) + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial f_2}{\partial x_{2i}} \Delta x_{2i},$$

$$\text{рівного } \Delta y_{2mp} = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial f_2}{\partial x_{2i}} \Delta x_{2i}.$$

Похибка Δy_{2mp} являє сумарний результат трансформації погрешностей аргументів x_{2i} в погрешності функції y_2 . На цій підставі її називають трансформованою.

Похибка моделювання тим більше, чим більше масштаби m_{xi} , m_y .

3.7 Наближені моделі об'єктів на мікрорівні

Точне рішення крайових задач можна одержати лише для деяких окремих випадків. Тому загальний спосіб їхнього рішення, у тому числі й у САПР, полягає у використанні різних наближених моделей. У даний час найбільш широке поширення одержали моделі на основі інтегральних рівнянь й моделі на основі методу сіток.

Основна ідея побудови моделі на основі інтегральних рівнянь полягає в переході від вихідного диференціального рівняння в частинних похідних до еквівалентного інтегрального рівняння, що підлягає подальшим перетворенням.

Сутність методу сіток складається в апроксимації шуканої безперервної функції сукупністю наближених значень, розрахованих у деяких точках області – вузлах. Сукупність вузлів, з'єднаних певним чином, утворює сітку. Сітка, у свою чергу, є дискретною моделлю області визначення шуканої функції.

Застосування методу сіток дозволяє звести диференціальну крайову задачу до системи нелінійних у загальному випадку алгебраїчних рівнянь щодо невідомих вузлових значень функції.

У загальному випадку алгоритм методу сіток складається з трьох етапів.

1 Побудова сітки в заданій області (дискретизація задачі).

2 Одержання системи алгебраїчних рівнянь щодо вузлових рішень (алгебраїзація задачі).

3 Рішення отриманої системи алгебраїчних рівнянь.

Найбільше часто в складі САПР використовуються два методи сіток:

1) метод кінцевих елементів (МКЕ);

2) метод кінцевих різниць (МКР).

Ці методи відрізняються друг один від одного на етапах 1 і 2 алгоритмами. На етапі 3 методи практично ідентичні.

3.8 Загальні відомості про моделювання на макрорівні

Використання математичної моделі об'єкта у виді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних можливо тільки для дуже простих технічних систем, і навіть у цьому випадку порядок апроксимуючої алгебраїчної системи рівнянь при моделюванні в тривимірному просторі може досягати 10^6 і більш. Тому при моделюванні на макрорівні в технічній системі виділяються досить великі елементи, що надалі розглядаються у виді неподільної одиниці. Безперервною незалежною перемінною залишається (у порівнянні з моделюванням на макрорівні) тільки час.

Математичну модель системи одержують об'єднанням компонентних і топологічних рівнянь.

Закони функціонування елемента підсистеми (надалі просто елемента) задаються компонентними рівняннями, що зв'язують, як правило, різнорідні фазові перемінні, стосовні до даного елемента, тобто компонентні рівняння зв'язують перемінні типу потоку з перемінними типу потенціалу.

Компонентні рівняння можуть бути лінійними або нелінійними, алгебраїчними, звичайними, диференціальними або інтегральними. Ці рівняння виходять на основі знань про конкретну предметну область. Для кожного елемента модельованого технічного об'єкта мають бути отримані компонентні рівняння. Це може виявитися тривалою і трудомісткою процедурою. Але ця процедура виконується однократно з одночасним нагромадженням бібліотеки підпрограм моделей елементів.

Компонентні рівняння одержують або теоретичним, або фізичним макетуванням, або математичним моделюванням на макрорівні.

Зв'язок між однорідними фазовими перемінними, які відносяться до різних елементів підсистеми, задається топологічними рівняннями, одержуваними на основі зведень про структуру підсистеми. Для формування топологічних рівнянь розроблені формальні методи. Очевидно, що процедура одержання топологічних рівнянь виконується для кожного модельованого об'єкта, тому що структури об'єктів різні.

У САПР доцільно використовувати математичні і програмні засоби, що забезпечують моделювання всієї номенклатури проєктованих об'єктів і які здатні адаптуватися до змінних умов експлуатації. Ці властивості досягаються, якщо застосовувані засоби мають високий ступінь універсальності. Одержанню універсальних засобів сприяє використання аналогій між підсистемами різної фізичної природи і між моделюючими їх компонентними і топологічними рівняннями.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ТА ДЕТАЛЕЙ ПІДЙОМНО- ТРАНСПОРТНИХ І БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

4.1 Аналіз експериментальних методів дослідження напруженого стану металоконструкцій і деталей кранів, екскаваторів і будівельних машин

Складність конструктивних форм вузлів і деталей сучасних кранів, різноманіття діючих на них навантажень в переважній більшості випадків не дозволяють визначити напружений стан іншим шляхом, іншими словами, нові машини не можуть бути правильно спроектовані і виконані без проведення експериментальних досліджень. Це стало абсолютно очевидним в останні роки, коли найбільш яскраво проявилася загальна тенденція в техніці – прагнення до високих параметрів поряд з постійно зростаючими вимогами до поліпшення показників надійності і зниження металоємності машин.

Безпосереднє вимірювання напруг за винятком контактних напружень на поверхні, неможливо, тому вимірюють деформацію, а по ній розраховують напруги.

При вимірі напружено-деформованих станів деталей і агрегатів при їх експлуатації використовують різні методи.

4.1.1 Експериментальні дослідження ПТБ і ДМ

Експеримент – науково поставлений досвід від лат. Experimentum - проба, досвід.

У НІ експеримент може мати значення:

- цілеспрямоване спостереження;
- відтворення об'єкта пізнання;
- організація особливих умов існування;
- перевірка гіпотез, припущень та ін.

Основна мета експерименту:

- виявлення властивостей досліджуваних об'єктів;
- перевірка справедливості гіпотез і на цій основі широке і повне вивчення теми наукового дослідження.

Експерименти та їх назва характеризуються і залежать:

- від галузей науки – фізичні, хімічні, технічні, психологічні;
- за способом формування умов проведення – природні та штучні;
- за цілями – перетворюючі, констатуючі, пошукові, вирішальні;
- по організації проведення - лабораторні, натурні, польові, виробничі;
- за характером взаємодії засобів експериментального дослідження суб'єктом

- досліджень (звичайний і моделей);
- за типом моделей (матеріальний і уявний).

Пошукові експерименти ставляться в тих випадках, якщо затруднена класифікація факторів, що впливають на досліджуване явище внаслідок відсутності достатніх даних.

Вирішальний експеримент ставиться для перевірки справедливості основних положень фундаментальних теорій.

Наприклад, науковий спір між Птолемеєм і Коперником про рух Землі. Вирішальний досвід Фуко з маятником остаточно вирішив суперечку на користь Коперника.

Уявний експеримент – це дослідження об'єкта чи явища за допомогою уявних або розумових моделей.

Основні терміни: ідеалізований та уявний.

Структура уявного експерименту включає:

- побудова уявної моделі об'єкта дослідження;
- ідеалізація умов експерименту і впливу на об'єкт;
- свідоме і планомірне комбінування (зміна) умов експерименту;
- свідоме і точне застосування на всіх стадіях експерименту і законів науки;
- обґрунтування висновків.

Наприклад: Галілей в уявному експерименті дійшов висновку про існування руху за інерцією, що перекинуло думку Аристотеля про те, що тіло перестав рухатися, якщо сила, що штовхає його, припиняє свою дію.

Матеріальний експеримент має аналогічну структуру, але основна відмінність матеріального експерименту від уявного в тому, що він являє собою форму об'єктивного матеріального зв'язку свідомості із зовнішнім світом, а уявний експеримент є специфічною формою теоретичної діяльності суб'єкта.

Активний і пасивний експерименти пов'язані з можливим впливом на вибрані вхідні сигнали (фактори) або тільки констатація існуючих факторів.

Однофакторний експеримент передбачає:

- виділення потрібних факторів;
- стабілізація чинників, що заважають;
- почергове вирівнювання факторів, що цікавлять дослідника.

Багатофакторний експеримент полягає в тому, що варіюються всі змінні відразу і кожен ефект оцінюється за результатами всіх дослідів, проведених в даній серії експериментів.

Для успішного проведення експерименту необхідно:

- розробити гіпотезу (пропозицію), що підлягає перевірці;
- створити програму експериментальних робіт;
- визначити способи і прийоми втручання в об'єкт дослідження;

- забезпечити умови для здійснення процедури експерименту;
- розробити шляхи і прийоми фіксування ходу і результатів експерименту;
- підготувати обладнання і вимірювальні засоби для проведення експерименту;
- забезпечити кваліфікованим персоналом.

Особливе значення має розробка методик експерименту.

Методика – це сукупність розумових і фізичних операцій, розміщених в певній послідовності, відповідно до якої рухається мета дослідження.

При розробці методик проведення експерименту необхідно врахувати:

- визначити вихідні дані (на основі гіпотез, пошуків, експериментів);
- створити умови для проведення експерименту;
- визначити межі зміни і вимірювання кожної величини;
- створити умови для реєстрації та відтворення експерименту;
- забезпечити перехід від експериментальних даних до теоретичних.

Особливу увагу слід звернути на вимір. Методи вимірювань повинні базуватися на законах спеціальної науки – метрології, що вивчає засоби і методи вимірювань.

Вимірювання буде більш-менш достовірним, якщо є достатня кількість повторних вимірів. Під мінімально потрібною кількістю розуміють таку кількість вимірювань, яка в даному досвіді забезпечує стійке середнє значення вимірюваної величини.

Важливим розділом методики є вибір методів обробки та аналізу результатів експериментальних даних.

Обробка даних зводиться до систематизації цифр, класифікації та аналізу результатів. Результати експерименту повинні бути зведені в легкі для читання форми запису – таблиці, графіки, формули, номограми, і т. д. Всі фізичні одиниці повинні бути виражені в системі СІ.

Обчислювальний експеримент – це дослідження, засновані на застосуванні прикладної математики і ЕОМ, як технічної бази при використанні математичних моделей.

Основні етапи обчислювального експерименту:

- будується фізична модель плюс допущення і обмеження, створюється на її базі математична модель;
- розробляється метод розрахунку;
- розробляється алгоритм і програма рішення;
- проводяться розрахунки;
- обробляються результати розрахунків і їх аналіз.

Приклад дослідження за двома критеріями.

Потрібно знайти оптимальне співвідношення b і h .

Умова міцності:

$$\sigma_n = \frac{Pl}{4W};$$

Умова міцності забезпечує нерівність:

$$\sigma = \frac{Pl}{4W} = \frac{3Pl}{2bh^2} \leq [\sigma];$$

$$b = \frac{3Pl}{2h^2[\sigma]}.$$

Обмеження:

Умова жорсткості виражається допустимим прогином балки Δ :

$$\Delta = \frac{Pl^3}{48EY},$$

E - модуль пружності при вигині;

$I = \frac{bh^3}{12}$ - момент інерції перерізу балки.

Тепер отримаємо нову нерівність:

$$b \geq \frac{Pl^3}{4E\Delta h^3}.$$

$\frac{h_1}{b_1}$ - оптимальне співвідношення.

Хоча в зоні А таких співвідношень може бути безліч, але при цьому міцність (металоємність) буде завищена.

4.2 Тензометричні методи вимірювання деформацій

В даний час одним з основних методів вимірювання деформацій в досліджуваних матеріалах є тензометричний, що дозволяє визначити напругу за величиною пружної деформації матеріалів. В основі цього методу лежить один принцип - визначення зміни бази, обмеженою ніжками тензометра.

Механічні тензометри використовують як для вимірювання статичних, так і динамічних деформацій деталей і конструкцій. Їх дія заснована на масштабному

перетворенні деформацій за допомогою механічної передачі до величини, зручної для реєстрації. Шкала наближення і необхідна чутливість визначають базу приладу. Механічні тензометри можуть зміцнюватися на досліджуваному об'єкті на весь час вимірювань або ж тільки для відліку показань з подальшим зняттям з об'єкта. У першому випадку тензометр повинен досить надійно закріплюватися на об'єкті. Однак сильне притиснення може викликати в досліджуваному об'єкті додаткові напруги і призвести до пошкодження призми тензометра. Тому при виготовленні тензометрів прагнуть зменшити його масу і зусилля, необхідне для переміщення їх механізму.

Так як зміни, як правило, малі, то для їх вимірювання часто застосовують спеціальні вимірювальні прилади. Механізм дії цих приладів заснований на передачі руху за допомогою зубчастої рейки, зубчастого колеса або важеля передачі, що дозволяє збільшити точність визначення вимірюваної величини.

Для вимірювання довжини конструктивного елемента в вимірювальних приладах механічного дії застосовуються опорні призми (ножі), одна з яких є рухомою.

Відомі тензометри Аїстова, що використовують принцип важеля або системи важелів і гвинтової пари (Рисунок 4.1). Деформація досліджуваного об'єкта призводить до переміщення ножа, що викликає відхилення другого плеча важеля. Це призводить до розмикання електричного кола і припинення сигналу індикатора 2. Повторне замикання ланцюга відбувається при обертанні гвинта 3, переміщення якого фіксується. Розбивши диск на 100 поділок, при кроці гвинта 0,5 мм і співвідношення плечей $n/m = 5$, отримаємо збільшення відліку по приладу $k = 100 \cdot 5 / 0,5 = 1000$, тобто ціну поділки, рівну 0,001 мм.

Прилад компактний і простий в експлуатації, виготовляється з базою 20 і 50 мм. Збільшення в схемі тензометра числа важелів призводить до зростання впливу на точність вимірювань мертвого ходу, властивого в більшій чи в меншій мірі всім тензометрам з механічною системою. Ступінь його впливу багато в чому залежить від старанності виготовлення і експлуатації.

Добре зарекомендували себе тензометри з індикаторами. Принцип їх роботи полягає в наступному. Деформація досліджуваного об'єкта сприймається важелем і передається на рухомий стрижень індикатора.

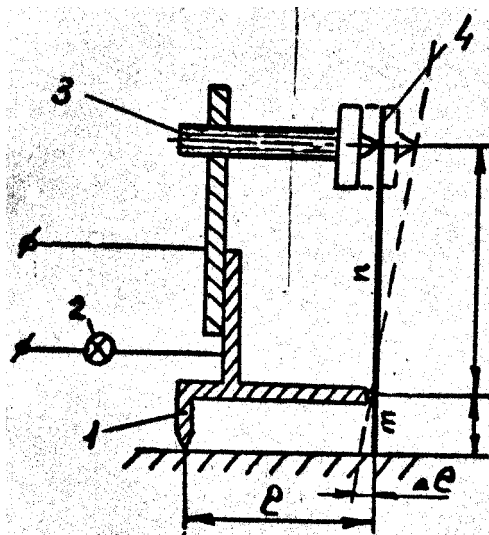
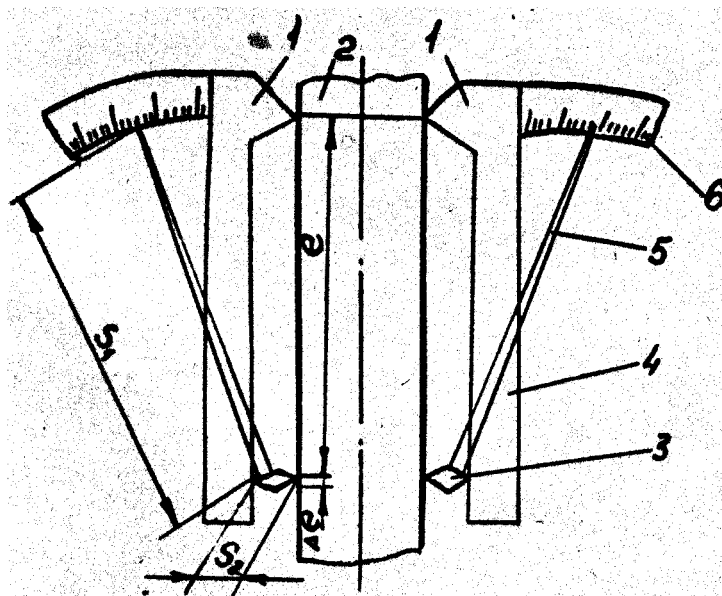


Рисунок 4.1 – Схема тензометра Аїстова:
 1 - нерухома опора; 2 - індикатор (сигнальна лампа);
 3 - регулювальний гвинт; 4 - рухливий важіль.



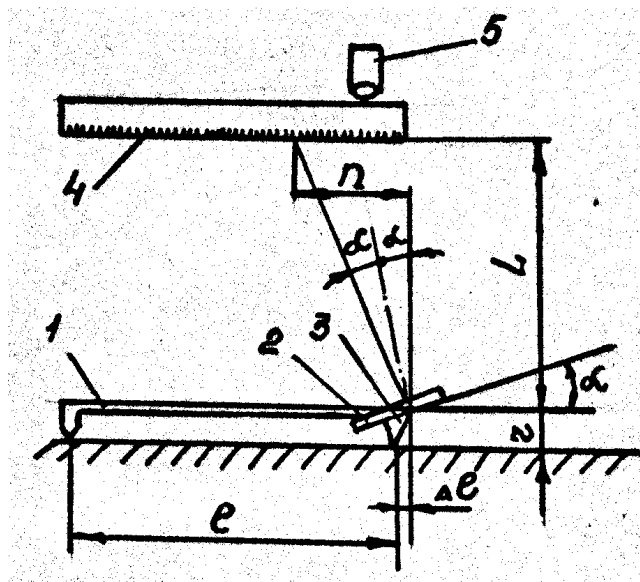
1,3 - ножі; 2 - деталь; 4 - рамка; 5 - стрілка; 6 - шкала.
 Рисунок 4.2 – Схема зміни подовжень по Кеннеді:

При цьому точність тензометра визначається точністю використовуваного індикатора і може бути підвищена зміною співвідношення плечей важеля.

Для вимірювання деформацій на різних ділянках конструктивного елементу використовують метод вимірювальних міток. Мітки наносять за допомогою невеликих сталевих куль, які спеціальним кернером вдавлюють в поверхню досліджуваного конструктивного вузла. Для вимірювання відрізків між кулями використовують один і той же вимірювальний інструмент. Його вимірювальні шрифти виконані у вигляді кулястих чаш, одна з яких розташована на рухомому важелі.

Механічні тензометри зазвичай використовують для попередньої оцінки розподілу деформацій на об'єкті.

В оптичних тензометрах для перетворення деформацій в зручну для реєстрації величину використовують оптичний (мережевий) промінь, при цьому відлік можна вести по переміщенню світлової плями за шкалою тензометра. За таким принципом виконаний тензометр Мартенса (Рисунок 4.3).



1 - нерухомий ніж; 2 - дзеркало; 3 - рухливий ніж;
4 - шкала; 5 - зорова труба.

Рисунок 4.3 – Схема тензометра Мартенса

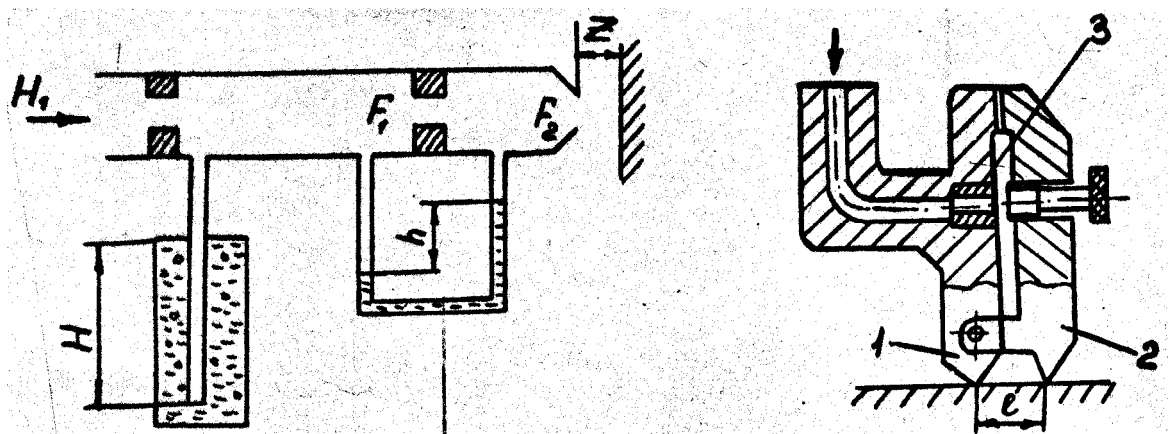
При деформації досліджуваного об'єкта дзеркало повертається на кут α , значення якого пропорційно Δl . Поворот дзеркала на кут викликає відхилення променя, відбитого від дзеркала, на кут 2α . Це призводить до переміщення світлової плями по шкалі на n одиниць. Якщо кут α малий, то $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \alpha$, тому $\Delta l = R \alpha = r \frac{n}{2L}$. Звідки, збільшення приладу $k = \frac{n}{\Delta l} = \frac{2L}{r}$.

При $r = 4 \dots 6$ мм і $L = 1 \dots 5$ м, збільшення дорівнює 500 - 2500.

В цілому ж оптико-механічні тензометри дають збільшення деформацій в 5000 - 10000 разів і знаходять застосування як для вимірювання статичних, так і динамічних деформацій.

Дія пневмоконтактних тензометрів засноване на вимірюванні витрати повітря через точки виміру (сопло), викликаного деформацією чутливого тензометра.

Якщо при постійному робочому тиску H повітря проходить через вхідний отвір F_1 (Рисунок 4.4) в камеру, а з неї через вихідний отвір F_2 назовні, то в камері між отворами встановлюється тиск h , який залежить від співвідношення ефективних площ F_1 і F_2 прохідних перетинів обох отворів. При цьому ефективна площа F_2 визначається зазором z при досить малих його співвідношеннях до діаметру вихідного отвору. Так як F_2 залежить від зміни досліджуваного переміщення, то вихідне сопло служить в якості вимірювального.



а - принципова схема; б - конструкція пневматичного тензометра.
Рисунок 4.4 – Вимірювання деформацій пневмоконтактними тензометрами:

Зміна стану повітря в системах низького тиску ($H=5-12$ кПа) супроводжується незначним зменшенням його щільності, що дозволяє вважати повітря нестисливим. Так, як швидкість витікання повітря в системі навіть при невеликому розкритті вимірювального сопла досить велика, то процес вважається адіабатичним. Для адіабатичного закінчення повітря з отвору при низькому тиску існує спрощена залежність:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}. \quad (4.1)$$

Цей вислів дає незначну похибку, якщо температура газу на вході стабілізатора тиску і далі по всій системі постійна і втрати тиску в системі повітропроводів відсутні.

Коефіцієнт перетворення (або чутливість) пневмоконтактної системи визначають як похідну виразу (4.1) по z :

$$k = \frac{dh}{dz}.$$

Коефіцієнт перетворення вимірювальної системи зростає зі збільшенням діаметра вимірювального сопла і зменшенням діаметра каліброваного. Внаслідок цього збільшення коефіцієнта перетворення при одночасному зменшенні межі вимірювання в пневмоконтактних вимірювальних системах досягається простим підбором сопел.

На рисунку 4.4 представлена конструктивна схема пневматичного тензометра. Деформація об'єкта сприймається опорними призмами 1 і 2, що веде до зміни перетину сопла 3.

Для забезпечення високої стабільності показань приладу пред'являються спеціальні вимоги до чистоти повітря.

У струнних (акустичних) тензометра використовується принцип залежності власної частоти f коливання струни від ступеня її натягу (деформації об'єкта).

Власна частота коливань струни при цьому може бути визначена:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}},$$

де l - вільна довжина струни;

σ - розтягуюче напруження;

ρ - щільність матеріалу струни.

Якщо кінці струни зміцнити таким чином, щоб вони були пов'язані з досліджуванним об'єктом, і деформація об'єкта передавалася струні, то при деформації об'єкта змінюється значення напруження в струні, а, отже, і частота її власних коливань. Вимірюючи останню, можна визначити деформацію досліджуваного об'єкта.

Струнні тензометри забезпечують отримання стабільних результатів протягом тривалого часу, якщо початкова напруження в струні невелике. Ця напруження має мати певне значення, так як важливо забезпечити стабільну коливальну характеристику. При виготовленні струнних перетворювачів в якості матеріалів використовують, високоякісні сталі з дуже високою міцністю. Місця кріплення струни повинні забезпечувати високу їх стабільність в часі.

Струнні перетворювачі забезпечують точність вимірювань, порівнювану з точністю тензорезисторних перетворювачів, але мають порівняно дорогу і складну конструкцію. Похибка вимірювань струнних тензометрів становить 10 – 6 відносних деформацій.

В основу роботи п'єзоелектричних датчиків покладено п'єзоелектричний ефект, який представляє собою здатність деяких матеріалів утворювати на гранях поверхні при механічному навантаженні електричні заряди. У природі п'єзоелектричним ефектом володіють кристали кварцу і турмаліну.

Заряд на гранях пластинок, вирізаних з кристала і орієнтованих щодо електричних осей кристала, оцінюється п'єзомодуль d , що встановлює пропорційність між виникаючим зарядом Q і прикладеною силою P .

Перетворювачі з кварцових платівок застосовуються частіше турмалінових, так як кварц має задовільні п'єзометрические властивості, дуже високий опір, відносно малу температурну залежність п'єзо- і ізоляційних постійних, високу механічну міцність і великий модуль пружності. Зміна п'єзомодуль зі зростанням температури аж до 300°C практично не спостерігається.

Турмалін на відміну від кварцу має не дві п'єзочувствительні площини, а одну. Тому, турмалінові пластини вирізують так, щоб їх робочі поверхні були перпендикулярні до оптичної осі. Турмалін в порівнянні з кварцом володіє значно більшою температурною залежністю п'єзомодуля. Крім того, він дуже рідко

зустрічається в природі і має високу вартість, що істотно обмежує його практичне застосування.

Пьезокерамічні датчики виготовляються головним чином для вимірювання швидкоплинних тисків і прискорень.

Принцип роботи ємнісних датчиків полягає в зміні їх електричної ємності при впливі на них вимірюваної величини. Ємність плоского конденсатора може бути виражена формулою:

$$c = 0,088 \frac{eF}{d} \quad (4.2)$$

де F - діюча площа обкладок, з яких складається конденсатор;

ϵ - відносна електрична проникність (для повітря $\epsilon = 1$);

d - товщина діелектрика (або зазору).

Ємність датчика може бути побудована на принципі використання зміни або діючої площі, або відстань між пластинами, або діючої діелектричної проникності.

Ємнісні датчики прості за конструкцією, однак в багатьох випадках не використовуються через необхідність застосування високих несучих частот, їх чутливості до потрапляння діелектричних речовин (води, масла), а також експлуатаційних труднощів при підключенні порівняно довгих кабелів. Тому, для вимірювання деформацій при експериментальних дослідженнях вони широкого застосування не отримали.

В основі роботи індуктивних датчиків лежить залежність реактивного опору котушки, що перевищує активний опір, тому реактивний опір визначається:

$$Z = 2 \pi f L,$$

де f - частота.

Магнітний опір магнітопровода тензметра R_M залежить від розмірів сердечника, його магнітної проникності і величини повітряного зазору між сердечником і якорем:

$$R_M = \frac{l_M}{\mu_M \square F_C} + \frac{l_B}{\mu_B \square F_B}, \quad (4.3)$$

де l_M і l_B – довжина магнітопровода сердечника і величина повітряного зазору;

F_C і F_B - площі поперечного перерізу сердечника і повітряного зазору;

μ_M і μ_B - магнітні проникності матеріалу сердечника і повітря.

Залежно від конструкції ці датчики можна використовувати для вимірювання довжин від 10 – 4 до 200 мм. Вони реагують на зміну зазору порядку $(1 \div 5) \cdot 10^{-7}$ м. Сучасні конструкції індуктивних тензометрів, як правило, нечутливі до зовнішніх впливів (ударом, високої вологості і температури); вони набули поширення за

кордоном, особливо для тензометрування в натурних умовах великих машинобудівних конструкціях і спорудах.

У магнітопружних тензометрах використовується ефект зміни магнітної проникності сердечника внаслідок його деформації.

Магнітопружний метод є неруйнівним експресметодом, що дозволяє визначати як діючі, так і залишкові напруги в інженерних конструкціях, а також проводити дослідження плоского напруженого стану, тоді як розглянуті вище методи такої можливості не дають.

Феромагнітні матеріали складаються з великого числа кристалів, кристалографічні осі яких спрямовані безладно. При відсутності зовнішнього магнітного поля феромагнітний матеріал складається з доменів, магнітні моменти яких спрямовані в різні боки і компенсують один одного.

У слабких магнітних полях відбувається зростання областей спонтанного намагнічення (доменів) з енергетично вигідним напрямком моменту. У більш сильних магнітних полях відбувається поворот векторів магнітних потоків до напрямку прикладеного поля. При збіганні всіх векторів з напрямком поля відбувається технічне насичення матеріалу. Одночасно з процесом намагнічування відбувається процес деформації кристалічної решітки, а, отже, змінюється намагніченість кристалів під дією механічної напруги.

Зміна магнітної проникності матеріалів під дією механічних напруг визначається співвідношенням:

$$\pm \Delta\mu = \frac{\mu_M^2 \lambda_M \sigma}{\rho \pm \lambda_M \mu_M} \quad (4.4)$$

де λ - магнітострикція;

μ - магнітна проникність матеріалу при відсутності напруги;

σ - величина механічної напруги.

Зі співвідношення 4.4 випливає, що зі зміни магнітної проникності $\Delta\mu$ можна визначити напруги, що діють в матеріалі.

Магнітопружні тензометри можуть виконуватися як знімними з передачею деформації через ножові опори, так і у вигляді пластинок з обкладинкою; ці пластинки наклеюють на об'єкт дослідження. Різновидом магнітопружних тензометрів є металеві пластинки (без обмотки), виготовлені зі спеціальних сортів пермаллоя (залізонікелевих сплавів з вмістом нікелю 50-70%), які кріплять до об'єкта дослідження приклеюкою або приварюванням. Зміну магнітної проникності всіх платівок внаслідок деформації вимірюють за допомогою одного індуктивного перетворювача.

При деформації деталі під дією механічних зусиль відбувається зміна її магнітної проникності, що призводить до зміни повного магнітного опору кола датчика. За допомогою магнітопружних датчиків можна вимірювати напругу до 50-80МПа.

Отримані в даний час теоретичні і експериментальні дослідження роботи магнітопружних перетворювачів дозволяють зробити висновок про те, що вони мають ряд переваг в порівнянні з іншими типами, а саме:

- по точності вимірювання поступають перетворювачам провідників, а їх вихідна потужність в десятки, тисячі разів перевищує вихідну потужність перетворювачів опорів;
- магнітопружні перетворювачі дозволяють визначити не тільки діючі, а й залишкові напруги в феромагнітних матеріалах;
- не вимагають підготовки поверхні матеріалу при вимірюванні в ньому механічної напруги.

Незважаючи на зазначені переваги, застосування магнітопружного ефекту в експериментальних дослідженнях обмежене через недостатню вивченість цього питання.

Дія електролітичних тензометрів заснована на зміні опору між висновками внаслідок переміщення одного з двох електродів, що знаходяться в електроліті, під дією вимірюваної деформації. Для лінеаризації градуєвальної характеристики використовується диференціальна схема (один рухливий і два нерухомих електрода). Ці тензометри мають обмежене поширення через недостатню стабільності.

Принцип дії індукційних тензометрів заснований на ефекті виникнення е.р.с. в котушці при переміщенні в ній магніту або переміщенні котушки в магнітному полі (в тому числі іншої котушки). Індукційні тензометри також відносяться до групи генераторних перетворювачів і можуть бути використані в основному для вимірювання швидкості зміни динамічних деформацій, оскільки е.р.с. на виводах котушки пропорційна швидкості зміни магнітного поля.

Датчики (дротові тензорезистори).

В основу роботи тензорезистора покладена залежність провідника R від його довжини l , питомого опору ρ і перетину F :

$$R = c \frac{l}{F}. \quad (4.5)$$

Зміни опору тензометрів передаються за допомогою кабелю на вимірювальний міст, де перетворюються в посилені електричні сигнали, величина яких визначається по приладу.

Зміна питомого опору провідника під впливом розтягуючих або стискаючих деформацій називають тензорезистивним ефектом. Він характеризується тензочутливістю, яка встановлює зв'язок між відносною зміною опору і відносною деформацією в напрямку вимірювань. Коефіцієнт тензочутливості тензорезистора:

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 1 + 2m + \frac{\Delta c / c}{\Delta l / l}. \quad (4.6)$$

де ΔR - зміна опору дроту;

R - початкове опір дроту;
 $\Delta l / l$ - відносне подовження;
 μ - коефіцієнт Пуассона.

Значення коефіцієнта тензочутливості дротяного тензорезистора істотно залежить від матеріалу дроту. Як матеріал для дротяних тензорезисторів часто використовують константан, ніхром, елінвар і едванс. Для найбільш поширених константанових датчиків (40% Ni і 60% Cu) величина $S \approx 2$.

Чутливі елементи тензорезисторів можуть бути виконані у вигляді петлеобразної решітки з точного дроту (Рисунок 4.5) фольги (Рисунок 4.5) і у вигляді пластинки монокристала з напівпровідникового матеріалу (Рисунок 4.5). Чутливі елементи можуть бути утворені напиленням у вакуумі напівпровідникової плівки і іншими методами. Чутливий елемент 1 (Рисунок 4.6) зазвичай прикріплюють до основи 3 з ізоляційного матеріалу (папір, лакова плівка, тканина та ін.) за допомогою сполучного (клею, цементу), які передають деформацію чутливого елемента. На об'єкті дослідження основу закріплюють також за допомогою сполучного. Для електричного з'єднання тензорезистора з вимірювальними схемами є висновки 2. Основними характеристиками тензорезистора є його база 1 (Рисунок 4.6) і опір. Найбільш часто застосовуються датчики з базою $5 \div 20$ мм, хоча виготовляються спеціальні тензорезистори з базами $1 < 1$ мм і $1 < 20$ мм. У тензовимірювальній практиці прийняті опори 50, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400 і 600 Ом.

Гранична деформація, що вимірюється, для всіх типів багатоелементних тензорезисторів становить 0,01 довжини бази.

Тензорезистори дозволяють:

- вимірювати деформації при різних розмірах бази, починаючи з десятих часток міліметра;
- проводити дистанційне вимірювання в великому числі точок;
- проводити вимірювання при самих різних зовнішніх умовах (вологість, тиск і т. Д.), Неприятливих для інших вимірювальних засобів.

Вони мають незначну масу, широкий частотний діапазон, низький поріг реагування, високу надійність і порівняльну вартість.

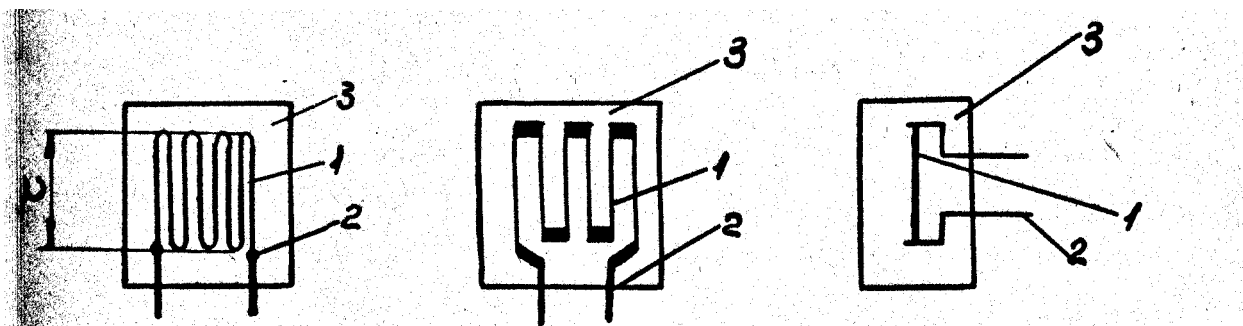


Рисунок 4.5 – Основні види тензометрів:

а - плоский дротяний; б - фольговий; в - напівпровідниковий;
1 - активний вимірювальний елемент; 2 - контактні висновки; 3 - підкладка.

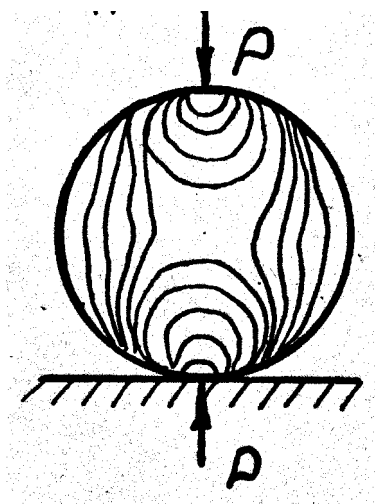


Рисунок 4.6 – Картина смуг в диску стислому зосередженими силами

Тензорезисторами властиві і деякі недоліки:

- неможливість індивідуального градування;
- можливість тільки одноразового використання;
- відносно висока чутливість і відносно низький абсолютний рівень вихідних сигналів;
- не можуть бути використані для вимірювання залишкових механічних напруг.

Однак ці недоліки не завадили широкому використанню тензорезисторів, як наймасовішого і універсального засобу експериментальних досліджень в машинобудуванні.

4.3 Поляризаційно-оптичний метод

Поляризаційно-оптичний метод або метод фотоупругості – експериментальний метод визначення напруженого стану деталей і конструкцій на прозорих моделях з оптично чутливих матеріалів, заснований на поляризації світла і властивості більшості прозорих ізотропних матеріалів набувати під дією навантаження здатність подвійного променезаломлення.

Поляризованим є світло, в якому напрям коливань світлових хвиль впорядкований. Для отримання поляризованого світла застосовують відображачі дзеркала, поляризаційні призми і поляроїдні плівки.

При навантаженні прозорі ізотропні матеріали стають оптично анізотропними і поведуться як двоякопреломляючі кристали. При цьому величина подвійного променезаломлення пропорційна значенням деформації об'єкта, яка визначається порядком інтерференційних смуг при просвічуванні матеріалу поляризованим світлом (Рисунок 4.6). Метод дозволяє визначати механічні напруги в досліджуваній деталі з точністю не гірше $\pm 2\%$.

До переваг методу фотоупругості слід віднести можливість вимірювання напруженого стану всієї поверхні об'єкта при візуальному контролі, високу точність вимірювання.

Поряд з незаперечними перевагами вказаний метод має ряд недоліків:

- необхідність ретельної підготовки поверхні;
- неможливість використання методу в місцях, недоступних для світла;
- значний вплив температури на оптико-механічну постійну.

Метод складний, вимагає дорогої вимірювальної апаратури, а вимірювання можна проводити тільки на моделях. Це представляє певні труднощі при випробуваннях об'ємних моделей.

4.4 Метод муарових смуг

В основі методу муарових смуг лежить муаровий ефект, суть якого полягає в появі темних і світлих смуг, що чергуються при накладанні однієї на іншу двох і більше растрових сіток з щільністю від 10 до 100 ліній на 1 мм.

Експериментальний метод, заснований на дослідженні картини муарових смуг має наочність поляризаційно-оптичного методу, однак внаслідок свого чисто геометричного характеру дозволяє досліджувати деформації незалежно від їх фізичної природи: пружні, вязкопружні, пластичні.

Вимірювання можуть проводитися при статичному і динамічному навантаженні як при нормальній, так і при високій температурі.

Існує кілька різновидів методу муарових смуг, що розрізняються видом сіток, що застосовуються для освіти муарових картин. Сітки можуть бути нанесені безпосередньо на досліджувану деталь, можуть бути використані зображення сіток, відбиті від дзеркальної поверхні деталі або отримані в результаті заломлення при проходженні світла через прозору деформовану деталь та ін. Виходячи з чутливості і точності методу, його застосовують головним чином для вимірювання середніх і великих деформацій ($\epsilon = 0,001 \div 0,1$) на плоских поверхнях конструктивних елементів.

4.5 Рентгенографічний метод вимірювання тиску

Він являє власне спосіб вимірювання подовжень. В якості вимірювальних міток для визначення подовження використовують відстань між атомами або міжплощинна відстань, що виникає в результаті дії зовнішніх сил або викликане власними напруженнями зміни міжплощинної відстані Δd може бути виміряна за допомогою явищ дифракції та інтерференції рентгенівських променів (4.9).

В основі цього виміру є рівняння, що представляє умова дифракції

$$n\lambda = 2d\sin\gamma \quad (4.7)$$

де n - ціле число, зазвичай прийняте рівним 1;
 λ - довжина хвилі випромінювання;
 d - міжплощинна відстань кристалічної решітки;
 γ - кут відображення і кут блиску.

Різниця ходу між променями 1 - 2 / і 2 - 2 / повинна дорівнювати цілому числу, кратному довжині хвилі випромінювання.

Якщо розглядати відносну зміну $\Delta d / d$ міжплощинної відстані d як відносне подовження решітки ε , то це подовження решітки пов'язано зі зміною $\Delta\gamma$ кута відображення γ за допомогою наступного виразу

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\operatorname{ctg} \gamma \Delta\gamma \quad (4.8)$$

Особливою перевагою цього методу є те, що вимір може бути виконано без відбору проб безпосередньо на деталі конструкції. Метод дозволяє визначити залишкові напруги в деталях без її руйнування, але вимагає дорогого і складного устаткування. Через малу глибину проникнення рентгенівських променів (для C0 - випромінювання до 0,016 мм, для C2 - випромінювання до 0,08 мм) можна вимірювати лише двоосні напружені стани на поверхні, тобто рентгенографічний метод малочуттєвий.

4.6 Метод тендітних покриттів

Методом тендітних покриттів називають неруйнівний спосіб визначення траєкторії головних напружень (деформацій) і геометричного місця кінців тріщин за допомогою спеціальних покриттів, руйнування яких відображає напружено-деформований стан досліджуваної поверхні.

Метод тендітних покриттів забезпечує досить просте і безпосереднє рішення певного класу інженерних задач, які не вимагають високої точності.

Суть методу полягає в тому, що на досліджувану поверхню наноситься покриття із спеціально підібраними характеристиками. Завдяки необхідній адгезії деформації, що виникає в об'єкті, передаються покриттю, яке під дією поля напружень руйнується, припадаючи сіткою тріщин.

Як матеріал покриття застосовують рідке і тверде покриття на основі каніфолі, емалева (керамічне), природні і наклеюються плівки.

Основними результатами випробувань є картина тріщин і послідовність їх виникнення при збільшенні або зменшенні навантаження.

Переваги методу:

- отримання експериментальної інформації по полю;
- можливість дослідження натурних об'єктів практично будь-якої

конфігурації;

- простота обробки первинних експериментальних даних.

Головний недолік методу – нестабільність отриманих результатів. З огляду на те, що похибка визначення деформацій і напружень методом тендітних покриттів досягає 10-20%, цей метод використовують тільки для оціночних вимірів, більш точні результати одержують застосуванням інших засобів високоточного тензометрування.

4.7 Метод гальванічних покриттів

Для вимірювання поверхневих покриттів, що виникають при повторно-змінному навантаженні досліджуваного об'єкта, а також для наближеного вимірювання концентрацій напружень в елементах конструкцій, що мають отвори і проточки, використовується метод гальванічних покриттів. Сутність його полягає в нанесенні на поверхню досліджуваного об'єкта мідного покриття, в структурі якого відбуваються зміни під дією циклічного навантаження і на поверхні об'єкта з'являються темні плями, які мають інформацію про значення діючих напружень.

У початковий момент дії навантаження на об'єкт спостерігається лише слабка поява плям в покритті. Зі збільшенням числа циклів навантаження плями стають більшими і виразнішими, збільшується їх кількість. Так як зазвичай товщина нанесеного покриття не перевищує 0,01 мм, то вважається, що деформація на поверхні основного металу відповідає деформації гальванічного покриття. Невеликі зміни товщини покриття майже не впливають на отримані результати.

Природа рекристалізації мідного покриття і виникнення темних плям на його поверхні ще не з'ясована, а сам метод знаходиться в стадії експериментальних досліджень.

4.8 Ультразвуковий метод визначення напруг

Цей неруйнівний метод визначення напружень у твердих тілах є досить універсальним, так як дозволяє визначати і залишкові напруги. При цьому виміри проводяться як на моделях, так і на натурних конструкціях.

Для збудження інших хвиль використовують ультразвукові випромінювачі, які генерують ультразвукові коливання, що володіють високою проникаючою здатністю та практично не залежить від агрегатного стану матеріалів.

Якщо випромінювач і приймач поляризованих хвиль однаково орієнтовані, то з-за повороту площини поляризації амплітуда коливань, що застосовуються приймачем, буде змінюватися в залежності від напруги в зразку. У разі відсутності напруги максимум амплітуди прийнятих коливань спостерігається при узгодженому розташуванні випромінювача і приймача. При наявності напруги отримати максимальну амплітуду прийнятих приймачем сигналів можна при певному куті неузгодженості, який дозволяє судити про значення напруг в досліджуваному зразку.

Широке застосування для оцінки плоского напруженого стану елементів отримав метод, заснований на використанні залежності швидкості поширення зсувних ультразвукових хвиль в твердому тілі з напругою від їх значення. При відомих фізико-механічних характеристиках матеріалу визначення напружень зводиться до зміни швидкості поширення двох зсувних ультразвукових хвиль, які спрямовані перпендикулярно до площини дії головних напружень і поляризовані у взаємно-перпендикулярних площинах, відповідних напрямках головних напружень.

Зміни швидкості ультразвукових хвиль під дією напружень дуже малі, тому апаратура для вимірювання швидкості їх поширення повинна володіти високою роздільною здатністю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Баловнев В.И. Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин. – М.: Машиностроение, 1981-232с.
2. Алабужев П.М. и др.. Теория подобия и размерностей. Моделирование.- М.: Высшая шк., 1968.-208с.
3. Седов Л.И. Метода подобия и размерности в механике,- М.: Наука, 1987-430 с.
4. Ловейкин В.С., Назаров І.І., Онищенко О.Г. Теорія технічних систем: Навч. посібник. – Київ – Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 175с.
5. Гліненко Л.К., Сухонос О.Г. Основи моделювання технічних систем: Навч. посібник. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», –2003, – 176с.
6. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 815с.
7. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Вища школа, 1988. – 317с.
8. Винников В.А. Теория подобия и моделирование. – М.: Высшая школа, 1984. – 479с.
9. Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.М. Моделирование развивающихся систем. – М.: Наука, 1983. – 337с.
10. Самарский А.А. введение в численные методы: Учебн. пособие для вузов. – 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 288с.
11. Лорьер Ж.Л. Системы искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1991. – 352.
12. Лойцекский Л.Г. Механика жидкости и газа.- М.: Дрофа, 2003. – 840с.
13. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. – М: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. – 504с.
14. Крупко В.Г. Моделирование Гусеничных механизмов передвижения экскаваторов. Г.Запрожье, ЗДТУ, Научный журнал 1, 1988, с 27-29
15. Крупко В.Г., Дихтенко Р.М. Математическое моделирование динамических процессов исполнительных механизмов экскаваторов. Вісник Східноукраїнського національного університету (СНУ) ім. В.Даля №5(135) 2009. - с.230-235.
16. Крупко В.Г., Дихтенко Р.М. Моделювання механічних систем робочого обладнання однокішшових экскаваторів. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машин. Праці конференції м. Львів: 2010р. с. 127-128.
17. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии.- Минск: Высш. шк., 1975. – 351 с.
18. Тензодатчики экспериментальных исследований / Под ред. Н.П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1972. – 144 с.
19. Крипецкий И.И. Основы научных исследований. – Киев; Одесса: Вища шк., 1981. – 208 с.
20. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике / Н.Джонсон, Ф.Лион. – М.: Мир, 1980. – 610 с.