

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

О.В. ГРИЦЮК

Професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння

ЕЛЕКТРОННИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З
ДИСЦИПЛІНИ «ВИПРОБУВАННЯ ДВЗ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 142
«ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ»
ПРИ ПРОФЕСІЙНОМУ СПРЯМУВАННІ
«ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ»

ЗАТВЕРДЖЕНО

На засіданні кафедри ДВЗ

Протокол № 12 від 19.03.2018 г.

Харків
ХНАДУ
2018

Грицюк О.В. Електронний конспект лекцій з дисципліни «Випробування ДВЗ» для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» при професійному спрямуванні «Двигуни внутрішнього згорання» обсягом 8,9 др. арк. В конспекті лекцій зібрані і структуровані згідно учбового плану матеріали, що формують об'єм знань з дисципліни «Випробування ДВЗ», визначені та описані сучасні методи вимірювання фізичних величин що являються основою випробувань ДВЗ. Приведені основні положення при створенні лабораторії випробувань двигунів їх обладнання і пристрої, організації автоматизованих випробувальних стендів, а також вимоги щодо сертифікації таких лабораторій.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
ТЕМА 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИПРОБУВАНЬ.....	11
1.1 Основні види випробувань двигунів внутрішнього згорання.....	11
1.2 Проведення випробувань.....	13
1.3 Вимоги до вимірювальних засобів і точності вимірювання.....	14
1.4 Технічна документація при випробуваннях.....	15
ТЕМА 2 СТАНДАРТНІ ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНІВ.....	19
2.1 Швидкісні характеристики.....	19
2.2 Навантажувальні характеристики.....	23
2.3 Регульовальні характеристики.....	26
2.4 Визначення токсичності відпрацьованих газів двигуна.....	31
2.5 Випробування на надійність.....	32
2.6 Методи визначення зносу двигунів.....	33
ТЕМА 3 ОСНОВНІ ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
3.1 Математичне планування випробувань ДВЗ.....	35
3.2 Вибір параметрів оптимізації.....	37
3.3 Керуючі фактори.....	37
3.4 Вибір моделі досліджуваної динамічної системи.....	38
3.5 Повний факторний експеримент.....	40
3.6 Властивості повного факторного експерименту типу 2^k	43
3.7 Дробовий факторний експеримент.....	44
ТЕМА 4 МЕТРОЛОГІЧНА ЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
4.1 Загальні визначення.....	48
4.2 Засоби вимірювання.....	49
4.3 похибки вимірювання.....	50
4.4 Метрологічні характеристики засобів вимірювання.....	51

ТЕМА 5 СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ.....	58
5.1 Середні арифметичні і середні квадратичні відхилення.....	58
5.2 Закон поширення помилок за Гаусом.....	59
5.3 Зважене середнє.....	60
5.4 Згладжування експериментальних залежностей методом найменших квадратів.....	61
5.5 Кореляційний аналіз.....	63
5.6 Загальні вказівки побудові графіків експериментальних залежностей.....	65
 ТЕМА 6 ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	68
6.1 Загальні положення.....	68
6.2 Датчики.....	71
6.3 Проміжні ланки вимірювальних систем.....	75
6.4 Вихідні пристрої інформаційних систем.....	77
 ТЕМА 7 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ.....	78
7.1 Визначення потужності двигуна.....	78
7.2 Вимір крутного моменту.....	80
 ТЕМА 8 ВИМІР ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ І ЧАСУ.....	85
8.1 Загальні положення.....	85
8.2 Тахометри, тахоскопи і тахографи.....	86
8.3 Вимір часу.....	90
 ТЕМА 9 ЗАСОБИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ.....	92
9.1 Рідинні термометри.....	92
9.2 Термоелектричні вимірники температури (термопари).....	93
9.3 Термометри опору.....	101
9.4 Вимір температур в ємностях і потоках.....	102

ТЕМА 10 ЗАСОБИ ВИМІРУ ТИСКІВ.....	105
10.1 Загальні положення.....	105
10.2 Рідинні манометри.....	106
10.3 Мікроманометри.....	107
10.4 Манометри з пружними чуттєвими елементами.....	109
10.5 Вимір тисків у потоках.....	110
10.6 Електричні засоби вимірювання тиску.....	114
ТЕМА 11 ЗАСОБУ ВИМІРУ ВИТРАТ РІДИН І ГАЗІВ.....	117
11.1 Звужувальні пристрої.....	117
11.2 Похибка вимірювання.....	120
11.3 Вимір витрати при малих числах Рейнольдса.....	122
11.4 Ротаметри.....	122
ТЕМА 12 АНАЛІЗ ГАЗІВ.....	125
12.1 Призначення й методи аналізу газів.....	125
12.3 Застосування аналізу газів для оцінки використання повітря й палива у двигунах.....	129
12.4 Вимір димовикиду відпрацьованих газів.....	130
ТЕМА 13 ВИЗНАЧЕННЯ ШУМУ, ВІБРАЦІЙ І ЗНОСУ ДВИГУНІВ.....	132
13.1 Загальні положення.....	132
13.2 Прилади й методи виміру шуму й вібрації двигуна.....	133
13.3 Вивчення зносу двигунів.....	134
ТЕМА 14 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ Й КОНТРОЛЮ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНІВ.....	137
14.1 Вимоги до частотних характеристик індикатора.....	137
14.2 Індикатори.....	140
14.3 Помилки індицирування.....	145
ТЕМА 15 ЛАБОРАТОРІЇ ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНІВ.....	147

15.1 Загальні вимоги до лабораторій.....	147
15.2 Випробувальні установки.....	147
15.3 Автоматизовані стенди з програмним керуванням.....	148
ТЕМА 16 АКРЕДИТАЦІЯ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ.....	151
16.1 Основні положення.....	151
16.2 Критерії акредитації лабораторії.....	151
16.3 Порядок проведення акредитації лабораторії.....	152
16.4 Функції, права й обов'язки акредитованої лабораторії.....	153
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	154

ВСТУП

Розширене виробництво автомобілів і тракторів і всебічна їхня роль у задоволенні потреб сучасного суспільства спонукує безупинно удосконалювати силові агрегати цих машин - поршневі, роторні, газотурбінні й інші двигуни.

Потужність і економічність, надійність і довговічність, викиди і токсичність – ці, і багато інших важливих оціночних показників двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) можуть бути визначені тільки в результаті їхніх випробувань. У залежності від мети, призначення, тривалості і т. д. ці випробування дуже різноманітні.

Сучасні випробування ДВЗ являють собою складний і трудомісткий технологічний процес, що мало відрізняється в сутності від експериментального дослідження. Весь цикл цього технологічного процесу розподіляють на три етапи:

- 1) планування й підготовка випробувань;
- 2) проведення випробувань;
- 3) обробка експериментальних даних.

Одночасно з розвитком конструкцій двигунів безупинно також обновляють як методи, так і техніку випробувань.

Основним методом проектування й дослідження двигунів внутрішнього згоряння є експериментальні дослідження, на основі яких установлюють залежності між параметрами двигуна. Аналіз результатів частіше носить якісний характер. Статистична оцінка коефіцієнтів і теорій, гіпотез використовується в недостатній кількості. Хоча правильність висновків експериментального дослідження не викликає звичайно, сумнівів, однак не представляється можливим оцінити його внесок в уточнення знань про фізику досліджуваних процесів. У силу складності взаємозв'язків параметрів і процесів в двигуні обробляють тільки частину отриманих експериментальних даних, тобто інформацію з різних процесів звичайно, не поєднують для оцінки коефіцієнтів рівнянь, що описують процеси.

Автоматизація запису й обробки показань датчиків на ЕОМ повною мірою поки не досягнута. Обробка осцилограм трудомістка, вірогідність отриманих результатів у більшості випадків незадовільна, особливо при великому числі змінних експериментальних параметрів або режимів, а також при дослідженні перехідних процесів у двигунах. Неясними залишаються багато питань, наприклад, скільки одноциклових осцилограм потрібно використовувати для оцінки експериментальних коефіцієнтів у формулах-гіпотез, що описують процеси, які гіпотези можна прийняти за однією осцилограмою і т. і.

Через тривалість аналізу інформації етапи дослідження часто перериваються. Якщо виконують весь експеримент відразу, то велика імовірність повторного проведення дослідження через вихід з ладу будь-якого датчика під час випробувань, або відхилення їх, параметрів від норми.

Метод оптимального планування багатofакторного експерименту найчастіше не застосовується для дослідження складних нелінійних залежностей у двигунах внутрішнього згоряння, тому що рідко вдається виконати умови активного експерименту: підтримувати фактори на заданих рівнях.

Проектувальні розрахунки двигунів засновані на використанні моделей робочих циклів. При цьому, як правило, вирішують задачу у вузькому плані: визначають потужність, ККД, максимальний тиск і т. і. При таких розрахунках використовують багато недостовірно заданих експериментальних коефіцієнтів. Оскільки у формулу підставляють випадково обрані значення коефіцієнтів (вибірki випадкових величин), то вихідні параметри розрахунку (моделі) не можна розглядати як оцінки математичних чекань - вони зміщені, тобто помилкові. Величина зсуву залежить як від неточності обраних коефіцієнтів, так і від не лінійності рівнянь щодо коефіцієнтів.

Не дивно, що центр ваги при створенні двигунів внутрішнього згоряння перенесений з етапу проектування на етап експериментального доведення конструкції.

При експериментальному доведенні конструкції ДВЗ математичні методи й обчислювальну техніку використовують ще менше, ніж при проектуванні й аналітичному дослідженні машин. Успішне завершення робіт залежить від досвіду й інтуїції експериментатора. Багато в чому воно визначається й експериментальною базою. Не випадково на створення нових сучасних машин затрачається багато часу й матеріалів.

Дана дисципліна “Випробування ДВЗ” включає основні положення з організації випробувань, теорії і практики вимірювання, вибору сучасних приладів і пристроїв, методів випробувань двигунів і їх, систем.

Уже сьогодні для дослідників ДВЗ очевидною є необхідність передачі рутинних робіт на плечі електронно-обчислювальних машин. У результаті серйозного ускладнення процедури вимірювання і обробки даних дослідник позбавлений можливості не тільки сам розробляти системи автоматизації, але й у деталях вивчити вимірювально-обчислювальний комплекс (ВОК). Таке ускладнення привело до розподілу праці, і розробкою ВОК стали займатися в основному фахівці з радіоелектроніки й автоматизації.

Багаторічний досвід, однак, показав, що вимірювально-обчислювальні комплекси, розроблені без участі дослідників, працюють, як правило, не дуже ефективно. Більш того, якщо сам дослідник не знайомий з пристроями, основними принципами організації роботи ВОК, то він не може правильно планувати дослідження, ефективно використовувати дороге устаткування й обладнання.

Тому представляється вкрай важливим навчити дослідників принципам роботи вузлів і блоків для автоматизації, методам побудови ВОК, способів їхнього ефективного використання.

Існує думка, що проведення експерименту є мистецтвом, якому не можна навчити, але якому можна навчитися. А навчити можна плануванню і підготовці експерименту, технології його проведення, порядку зміни й урахування умов проведення експерименту, оцінці помилок, перетворення

результатів випробувань у наочні й зручні для аналізу форми і ще такого іншого, що складає сутність експерименту на окремих його етапах.

ТЕМА 1

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИПРОБУВАНЬ

1.1 Основні види випробувань двигунів внутрішнього згорання

Всі випробування ДВЗ можна розділити на дві групи у залежності від умов їх, проведення:

1. Стендові випробування, при яких двигуни випробуються на гальмових стендах, що дозволяють імітувати будь-які умови навантаження на двигун.

2. Ходові (експлуатаційні) випробування, що виконуються в процесі експлуатації об'єкта, для якого призначений двигун.

Як правило, стендові випробування проводяться на сталих режимах і тому не дають повного уявлення про показники двигуна, що він буде мати в експлуатації.

Результати експлуатаційних випробувань більш коштовні, тому що двигун працює при змінних навантаженнях, на перехідних режимах і т. і., що повною мірою важко імітувати на стенді.

Проте, стендові випробування більш поширені, завдяки меншій трудомісткості, можливості реалізації чіткої програми випробувань і зручності її повторення, можливості виконання рівнобіжних випробувань декількох двигунів в однакових умовах, використання стандартної апаратури, автоматизації процесу випробувань і т. і.

Основні правила проведення випробувань регламентовані державними стандартами України (ДСТУ). Доводочні і дослідницькі роботи стандартами не регламентуються, тому що вони різноманітні по цілям, застосовуваному устаткуванню, об'єму й методикам проведення випробувань.

У залежності від мети випробувань останні підрозділяються на кілька різновидів (рисунок 1.1)

1. Дослідницькі випробування - проводять із метою удосконалювання існуючих двигунів, переходу на нові або модернізовані типи двигунів і т. і.

Щоб підкреслити цільове призначення, іноді виділяють випробування на знос, пускові, регулювальні, на токсичність і димовикід, на витривалість, надійність і т. і.

2. Доводочні випробування - проводять із метою перевірки відповідності обраних параметрів двигуна й основних його оціночних показників розрахунковим, доведенню як двигуна в цілому, так і всіх його елементів до рівня вимог, установлених технічним завданням на проектування.

3. Приймальні випробування проводяться після завершення всіх доводочних робіт з метою визначення відповідності двигуна проектному завданню, сучасності і досконалості його конструкції, рівня техніко-економічних показників, надійності, пускових якостей, а також можливості подальшого розвитку й поліпшення його конструкції.



Рисунок 1.1 – Класифікація випробувань ДВЗ

4. Сертифікаційні випробування проводять із метою офіційного визначення техніко-економічних параметрів двигуна, окремих його агрегатів і вузлів і відповідності їх міжнародним стандартам, стандартам країни або регіону, де передбачається експлуатація даного виробу.

5. Контрольні випробування серійних двигунів проводять з метою перевірки відповідності їхніх показників затвердженим технічним умовам і стабільності параметрів двигунів, що випускаються.

6. Приймально-здавальні випробування проходять усі серійні двигуни, що виходять із заводу, на випробувальній станції моторного цеху з метою перевірки відповідності двигуна технічним умовам показників потужності й економічних показників.

7. Гарантійні випробування проводяться з метою перевірки надійності двигуна з точки зору зносу деталей, моторесурса і т. і., а також перевірки ефективності змін й удосконалень, внесених у конструкцію двигунів.

1.2 Проведення випробувань

Двигуни перед початком будь-яких випробувань спочатку обкатують за програмою заводу - виготовлювача, але не більш 60 год.

Типові випробування, як правило, проводять на прогрітому двигуні, який попередньо відрегульований, відповідно з інструкцією заводу. Якщо немає конкретних указівок на вибір теплового стану для даного двигуна, то стандарти рекомендують підтримувати температуру рідини на виході із двигуна на рівні 80...90 °С, а температуру мастила в картері 85...95 °С. Випробування двигунів із повітряним охолодженням проводиться при температурі навколишнього повітря не вище 40 °С, а температура мастила - не повинна виходити за межі 100 °С. Випробування проводять на паливі й мастилі, що рекомендуються заводом при наявності на ці експлуатаційні матеріали сертифікаційного паспорта.

У дослідницьких випробуваннях регулювання механізмів і систем двигуна, його тепловий режим, вибір експлуатаційних матеріалів та інші умови обмовляються в програмі робіт.

При визначенні характеристик двигуна кількість точок виміру повинно бути не менше 6...8, якщо це повною мірою дозволяє виявити закономірність між змінними параметрами і взаємозв'язаними з ними обстежуваними

параметрами. Показники варто визначати за сталим режимом роботи, а вимірювані параметри повинні мати середні стійкі значення і не змінюватися не менш 1 хв.

Перед початком випробувань, у процесі проведення і по закінченні їх обов'язково визначають і фіксують наступні вхідні дані і величини, що спостерігаються: тип двигуна й випробувальної установки; сорт і густину палива й мастила; тиск, температуру і вологість навколишнього повітря; температуру рідини, що охолоджує, на виході з двигуна; температуру і тиск мастила; показання динамометра; частоту обертання колінчастого вала; середній тиск у впускному трубопроводі; витрати палива й повітря; кут випередження запалювання або подачі палива. У разі потреби кількість вимірюваних величин не обмежуються перерахованими.

1.3 Вимоги до вимірювальних засобів і точності вимірювання

Параметри вимірювальної апаратури, що застосовується, повинна забезпечувати:

- 1) задану точність виміру обстежуваних параметрів;
- 2) стабільність показань у реальних умовах випробувань;
- 3) необхідна швидкодія при одночасному виключенні можливості появи помилок або відказів у роботі вимірюваних приладів;
- 4) необхідну чутливість дії.

Крім того, бажано, щоб вимірювальні пристрої і прилади мали як можна менші габарити і масу, просту й зручну для спостережень, регулювання й обслуговування конструкцію, та допускали б дистанційний вимір.

При типових випробуваннях, як вимагають держстандарти на випробування ДВЗ, достатньою вважають точність $\pm 0.5\%$ при вимірі крутного моменту, частоти обертання колінчастого вала двигуна й витрати палива (масовим способом). Температуру навколишнього повітря вимірюють із точністю $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; тиск до ± 1 мм рт. ст.; відносну вологість його - з точністю ± 2

%; витрати повітря - з точністю ± 2 %, а картерних газів - ± 3 %; температуру охолодної рідини й мастила - з точністю ± 1 °C; температуру відпрацьованих газів до ± 20 °C і тиск останніх - із точністю ± 3 %.

У дослідницьких випробуваннях вимоги до точності параметрів, що заміряються, відповідно підвищується в залежності від цілей дослідження.

При дотриманні зазначених рекомендацій на виміри точність визначення величини ефективної потужності складає приблизно ± 2 % для типових і менш ± 1 % у дослідницьких випробуваннях; відповідно питома витрата палива - ± 3 % і приблизно ± 1 %.

Докладно про принципи роботи окремих приладів, їх конструкції та правилам користування ними приведені у відповідних розділах курсу. Тут лише відзначимо, що усі виміри варто виконувати приладами і пристроями, що своєчасно були перевірені або тарувальні відповідно до вимог положення про контроль вимірювальних приладів.

1.4 Технічна документація при випробуваннях

Випробування двигунів завжди проводять відповідно до програми й оформляють відповідно з технічною документацією.

Поняття технічної документації включає: програму випробувань, схему препарування двигуна, протокол випробувань, результати тарування або контролю вимірювальних приладів у виді графіків або таблиць.

1.4.1 Програма випробувань

Успіх випробувань у значній мірі залежить від проведеної підготовки й їх організації. Програма випробувань є основним документом, у якому перелічуються всі підготовчі роботи і регламентується проведення експерименту.

Незважаючи на деякі відмінності в змісті різних програм випробувань і різний підхід при їхньому оформленні, можна виділити ряд основних пунктів, що включаються в усі програми, а саме:

- 1) мета проведення випробувань;
- 2) характеристика об'єкта випробувань;
- 3) параметри, що підлягають виміру, методика замірів і застосовувані прилади;
- 4) умови проведення випробувань;
- 5) режими й порядок проведення випробувань;
- 6) порядок обробки й оформлення результатів випробувань.

Розглянемо більш докладно зміст основних розділів програми.

Мета випробувань

У цьому розділі програми дається чітке формулювання мети випробувань. Варто пам'ятати, що від постановки задачі випробувань залежать, у першу чергу, умови, у яких вони повинні проводитися, вибір стенда і його доробка, препарування об'єкта дослідження, принципова схема вимірювання і вибір необхідних приладів, та вибір основних режимів роботи двигуна.

Об'єкт випробувань

У цьому розділі програми, крім початкових даних об'єкта випробувань, указують яку необхідно зробити доробку в конструкцію двигуна або в конструкції його агрегатів.

Методика проведення експерименту й виміру

Дуже часто одну і ту характеристику можна визначити різними методами. Кожний метод вимагає визначеного інженерно-технічного забезпечення, а саме

дообладнання двигуна додатковими вимірювальними системами, або частих перебирань двигуна. Може також знадобитися і доробка стенда. У ряді випадків, крім виконання умов випробувань, за прийнятим методом потрібно також забезпечення простоти проведення випробувань і мінімальних матеріальних витрат. Вирішальним критерієм для оцінки того чи іншого методу є ступінь вірогідності визначення параметрів.

У програмі приводять перелік величин, які необхідно вимірювати, застосовуваних приладів, указується необхідна точність приладів і діапазон вимірювання, при необхідності дають обґрунтування застосування того чи іншого методу виміру.

Умови проведення випробувань

У цьому розділі програми характеризуються умови проведення випробувань, при необхідності включають і тепловий режим двигуна. Крім того, тут указуються марки палива й мастила. Але основне призначення розділу - докладне визначення специфічних умов випробувань.

Режими й порядок проведення випробувань

Приводиться докладне перерахування всіх робіт у необхідній послідовності. Одночасно вказуються режими (за частотою обертання й навантаженню), на яких проводяться випробування двигуна, якщо необхідно, то вказують час роботи на кожному режимі й порядок виконання необхідних вимірювання.

Порядок обробки й оформлення результатів випробувань

Наприкінці програми нерідко вказують порядок обробки експериментальних даних. При стандартних випробуваннях - це перелік

залежностей для одержання шуканих параметрів і для приведення їх до стандартних умов. Тут же вказується, в якому вигляді будуть оформлені результати випробувань.

ТЕМА 2

СТАНДАРТНІ ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНІВ

Техніко-економічні й інші показники роботи двигунів внутрішнього згоряння, як правило, оцінюють за характеристиками, які одержують при стендових випробуваннях.

Характеристикою називають графічне зображення залежності одного чи декількох показників роботи двигуна від параметра, який прийнятий за незалежний.

2.1 Швидкісні характеристики

Характеристики цього виду являють собою графічне зображення закономірності зміни досліджуваних параметрів двигуна від частоти обертання колінчастого вала. Основними з них є зовнішня і часткові швидкісні характеристики, характеристики холостого ходу й умовних механічних втрат.

Зовнішньою швидкісною називають характеристику, яку одержують при повному відкритті дросельної заслінки в карбюраторних двигунах, або при крайньому граничному положенні важеля керування рейкою насоса високого тиску, що відповідає повної подачі палива в дизелях. Зовнішню швидкісну характеристику знімають у діапазоні частот обертання вала $n_{\text{мін}} \dots 1.1 \cdot n_{\text{ном}}$ для двигунів з іскровим запалюванням, що працюють без обмежника, $n_{\text{мін}} \dots n_{\text{мах}}$ - для дизелів.

Зняття зовнішньої швидкісної характеристики полягає в наступному. При прогрітому працюючому двигуні збільшують подачу пальної суміші (при зовнішньому сумішоутворенні), або палива (при внутрішньому сумішоутворенні) і одночасно навантажують його за допомогою гальмового пристрою так, щоб на режимі повної подачі вал двигуна розвивав мінімальну стійку частоту обертання ($n_{\text{мін}}$). Після стабілізації режиму заміряють необхідні показники. Далі навантаження поступово зменшують, і після стабілізації

режиму роботи знову роблять виміри і т. д. поки частота обертання колінчастого вала не досягне вищевказаних меж. Типові зовнішні швидкісні характеристики двигунів з іскровим запалюванням і дизелів приведені на рисунку 2.1. Насамперед, вони дозволяють оцінити енергетичні й економічні показники двигуна, визначають мінімально стійку частоту й частоту обертання вала, що відповідає максимальному крутному моменту або мінімальній питомій витраті палива. При наявності регулятора (обмежника) частоти обертання колінчастого вала двигуна зовнішня швидкісна характеристика дозволяє також визначати момент включення регулятора (обмежника) і оцінити ступінь нерівномірності роботи останнього.

Частковою швидкісною називають характеристику, яку одержують при деяких проміжних положеннях дросельної заслінки, постійних для кожної характеристики, або незмінному положенні важеля керування, що відповідає неповній подачі палива насосом високого тиску в дизелях.

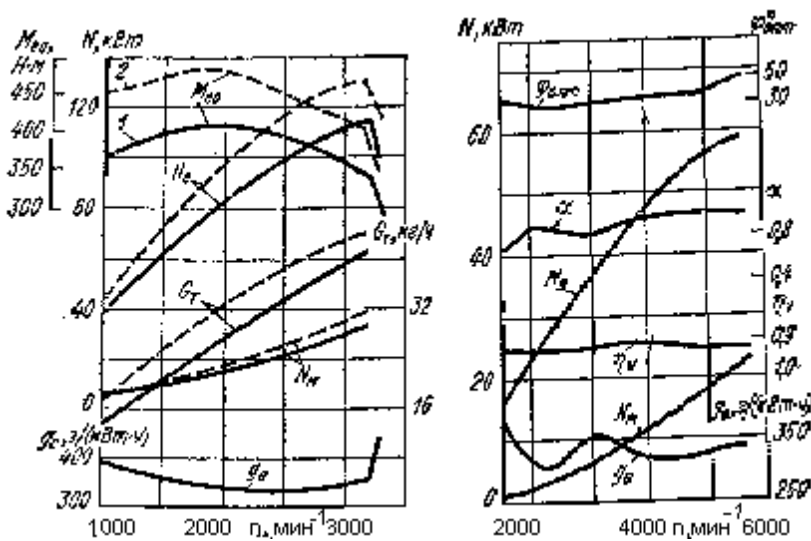


Рисунок 2.1 - Зовнішні швидкісні характеристики двигунів

Характеристика холостого ходу являє собою графічне зображення годинної витрати палива при роботі двигуна без навантаження. Для карбюраторних двигунів її часто зображують у виді графіка розрядження поза дросельного простору впускного тракту.

При знятті характеристики холостого ходу гальмо від'єднують і шляхом вибору положення для дросельної заслінки або рейки насоса змінюють частоту обертання вала прогрітого двигуна від $n_{\text{мін}}$ до частоти обертання, рівного $0.5 \cdot n_{\text{ном}}$, дотримуючи встановленого регулювання паливної апаратури й запалювання.

Для тракторних двигунів характеристику визначають від $n_{\text{мак}}$ холостого ходу до мінімально стійкої частоти обертання вала (коливання не повинні перевищувати $\pm 5\%$).

Мінімальна частота обертання двигуна $n_{\text{мін}}$ визначається моментом настання коливання обертання колінчастого вала, після чого частоту обертання збільшують до одержання усталеної роботи двигуна протягом 10 хв.

Характеристика механічних втрат у двигуні являє собою графічне зображення потужності, яка затрачується на подолання тертя в його механізмах і на привід допоміжних механізмів, в залежності від частоти обертання вала. До складу потужності механічних втрат умовно включають також потужність, яка затрачується на газообмін у двигуні.

Характеристику механічних втрат визначають методом прокручування вала випробуваного двигуна за допомогою балансирної машини, у діапазоні частот обертання $n_{\text{мін}} \dots n_{\text{ном}}$ (або $n_{\text{мак}}$ для дизелів) при відсутності подачі палива, після попереднього прогріву двигуна.

Потужність механічних втрат двигуна, кВт, визначають за формулою

$$N_{\text{мв}} = \frac{a \cdot P \cdot V_{\text{л}} \cdot n}{120}, \quad (2.1)$$

де a - постійна для даного двигуна, визначають за формулою $a = 22.5 \cdot k$;

k - постійна гальма;

P - показання динамометра гальмової установки, кг;

$V_{\text{л}}$ - літраж двигуна, л;

n - частота обертання вала, хв^{-1} .

Величину механічного ККД знаходять із співвідношення між потужностями ефективної N_e і механічних втрат $N_{m,y}$

$$\eta_m = N_e / (N_e + N_{m,y}). \quad (2.2)$$

Стандарти на випробування двигунів допускають також визначення механічних втрат методом вимикання циліндрів. Двигун при цьому навантажують гальмівним устроєм відповідно з режимом максимального крутного моменту ($M_{кр\ max}$) і потім при послідовному вимиканні кожного з циліндрів визначають показники роботи й коефіцієнт механічних втрат. Коливання частоти обертання щодо прийнятих не повинні перевищувати $\pm 1\%$.

Методом вимикання циліндрів визначають одночасно і рівномірність їхньої роботи, що оцінюють коефіцієнтом рівномірності

$$\Delta = N_{i\ min} / N_{i\ max}, \quad (2.3)$$

де $N_{i\ min}$ і $N_{i\ max}$ - відповідно найменше й найбільше значення умовної індикаторної циліндрової потужності, кВт.

У дослідницькій практиці для визначення величини механічних втрат застосовують, звичайно, пряме індицирування циліндрів двигуна. Потім визначають цим методом механічний ККД

$$\eta_m = N_e / N_i,$$

можна знайти потужність механічних втрат

$$N_{m,y} = (1 - \eta_m) \cdot N_i$$

с погрішністю, що не перевищує допустиму, тобто – $\pm 5\%$.

Величину механічних втрат усі частіше визначають методом подвійного вибігу. Для цього знімають тахограми обертання колінчастого вала двигуна, що

він робить після відключення подачі палива чи вимикання запалювання за рахунок запасу кінетичної енергії його деталей, що рухаються, (перший вибіг) і разом із відомим додатковим моментом інерції (другий вибіг). Точність методу не поступає точності індицирування.

2.2 Навантажувальні характеристики

Характеристики, що виявляють закономірність зміни ряду параметрів двигуна в залежності від зміни навантаження при заданій постійній частоті обертання колінчастого вала, називають навантажувальними.

При знятті навантажувальних характеристик двигун прогрівають до нормального теплового стану, виводять його на заданий швидкісний режим і поступово збільшують відкриття дроселя в двигунах із зовнішнім сумішоутворенням (переміщують рейку паливного насоса в дизелях) від положення, що відповідає холостому ходу на даному швидкісному режимі, до повного їхнього відкриття (граничного положення рейки), зберігаючи заданий швидкісний режим шляхом навантаження двигуна за допомогою гальмівного устрою. У якості незалежного перемінного параметра стандарти рекомендують приймати потужність двигуна. Приклад навантажувальної характеристики приведений на рисунку 2.2.

Навантажувальні характеристики, визначені для ряду частот обертання колінчастого вала, дозволяють визначити закономірність годинної витрати палива при збільшенні навантаження, виявляють мінімальні питомі витрати палива, момент включення економайзера в карбюраторних двигунах і величину максимальної потужності на цих швидкісних режимах.

Крім того, є можливість визначити початок видимого димовикиду дизелями, будувати регульовальні характеристики за тисками впуску й випуску.

Наочність графічного зображення характерних параметрів двигуна трохи втрачається, коли маємо справу з великою серією характеристик. Тому доцільно будувати багатопараметрові характеристики.

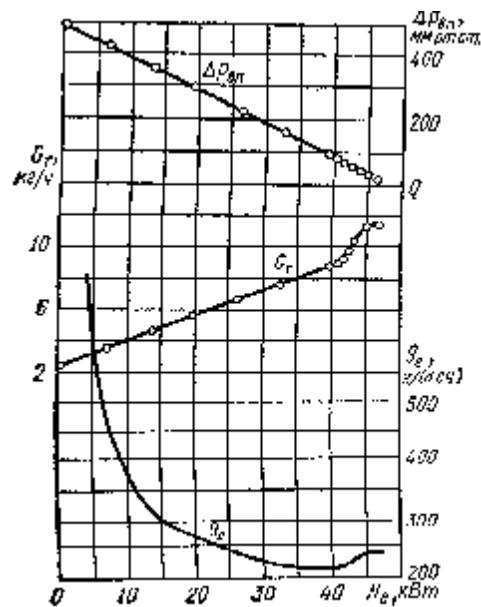


Рисунок 2.2 - Навантажувальна характеристика карбюраторного двигуна

Багатопараметрові (універсальні) характеристики в загальному випадку будують у координатах (x) і (y) за результатами обробки серії вхідних характеристик, що виявляють залежність обстежуваного параметра (z) від перемінного (x) при різних постійних значеннях (y). Оскільки кожна точка багатопараметрової характеристики відповідає лише одній парі значень (x) і (y), їй можна приписати однозначне значення (z), узятє з допоміжних характеристик. На рисунку 2.3 багатопараметрова характеристика узагальнює серію навантажувальних.

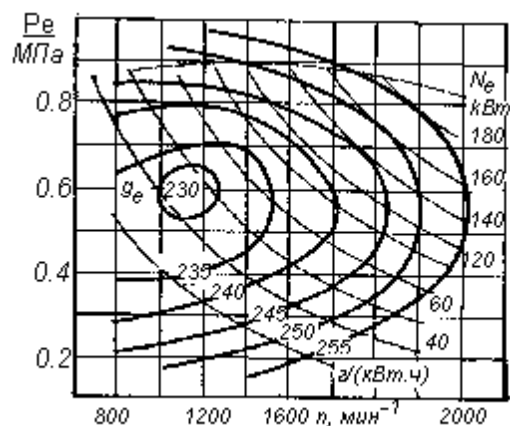


Рисунок 2.3 - Багатопараметрова характеристика дизеля

Лінії питомої витрати палива (g_e) дають повне уявлення про економічність двигуна у всьому діапазоні його можливих швидкостей і навантажень і виявляють зону режимів найкращої економічності. На багатопараметрову характеристику наносять також лінії постійних значень додаткових показників. Такими в розглянутому випадку є графіки потужності й початку видимого димовикиду (останній показаний штриховою лінією).

Регуляторні характеристики визначають за швидкісним режимом, що відповідає $M_{крмаx}$ і постійним положенням органів керування регулятором паливного насоса високого тиску (ПНВТ) шляхом постійного збільшення навантаження від холостого ходу до максимально можливого, відповідно технічним умовам на регулювання ПНВС (рис. 2.4). Якщо регулятор установлений на часткову подачу палива, то одержують часткові регуляторні характеристики.

Регуляторна характеристика виявляє залежність частоти обертання колінчастого вала від потужності двигуна при незмінному положенні важеля керування регулятором. За даною характеристикою визначають ступінь нерівномірності роботи регулятора

$$\delta = (n_{x/x \max} - n_p) / n_{cp}, \quad (2.4)$$

де n_p - частота обертання колінчастого вала двигуна, що відповідає початку дії регулятора;

$n_{x/x \max}$ - максимальна частота обертання колінчастого вала на холостому ході, що допускається регулятором;

n_{cp} – середня частота обертання колінчастого вала на холостому ході

$$n_{cp} = (n_p + n_{x/x \max}) / 2.$$

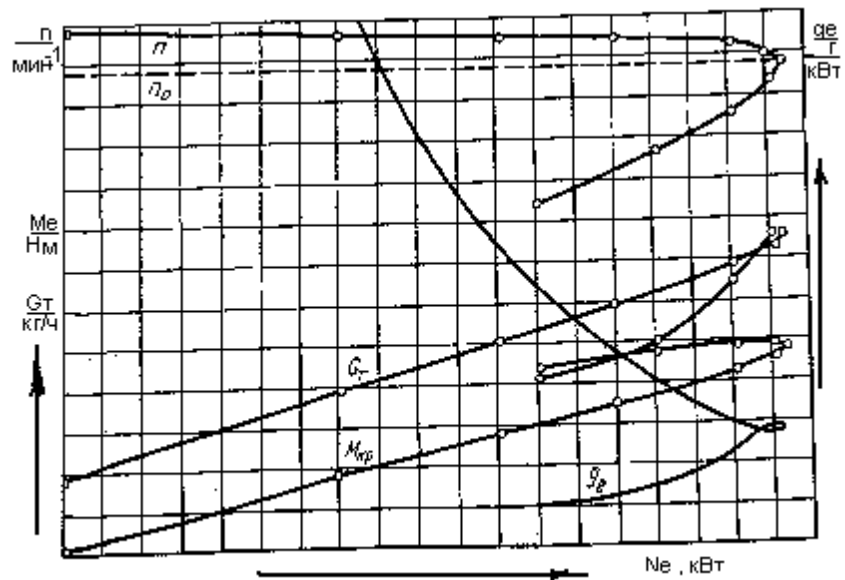


Рисунок 2.4 - Регуляторна характеристика дизеля

2.3 Регулювальні характеристики

Вибір параметрів регулювань паливної апаратури й запалювання двигунів проводять, як правило, експериментальним шляхом - методом зняття характеристик, що називаються регулювальними. В основі цих характеристик лежать витрата палива й кут випередження запалювання або момент подачі палива в циліндри, а також витрата повітря при незмінному навантаженні двигуна. Характеристики дозволяють виявляти склад робочої суміші й оптимальні моменти її запалення, що дозволяє максимально використовувати тепло, яке вноситься паливом у циліндри.

Регулювальні характеристики за складом суміші (за витратою палива) являють собою графічне зображення залежності ефективної потужності (N_e) і ефективної питомої витрати палива (g_e) від годинної витрати палива (G_T) (коефіцієнта надлишку повітря (α)) при постійних частотах обертання колінчастого вала, положенні дросельної заслінки, тепловому стані двигуна й оптимальному куті випередження запалювання.

На рисунку 2.5 приведена регулювальна характеристика за витратою палива і зазначені прийоми графічної її обробки. Визначення регулювальної характеристики за витратою палива полягає в наступному.

Двигун прогрівають і виводять на швидкісний режим із заданою частотою обертання колінчастого вала, яку зберігають сталою у всьому можливому при цьому діапазоні зміни потужності (N_e). З цією метою постійно збільшують кут відкриття дросельної заслінки до потрібної величини й одночасно за допомогою гальма підвищують навантаження так, щоб забезпечити прийняте $n = \text{const}$.

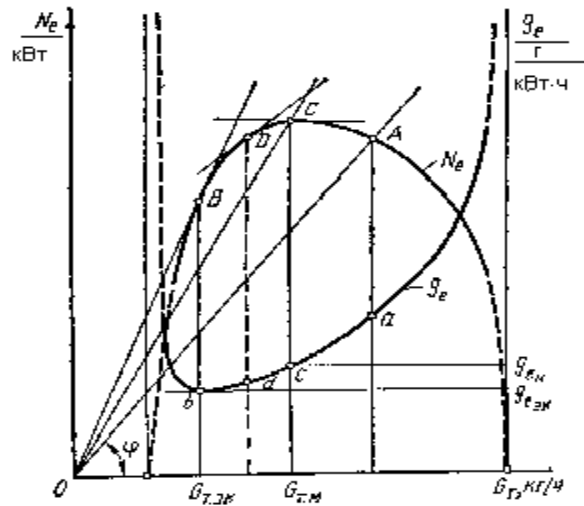


Рисунок 2.5 - Регульовальна характеристика за витратою палива

Визначення характеристики можна починати як із збідненого, так і зі збагаченого складу пальної суміші. Можливий діапазон годинної витрати палива (G_{Γ}) обмежений межами займистості пальної суміші (α_{Γ}). Регулювання на максимальну потужність ($N_{e\text{max}}$) знаходять побудовою дотичної лінії до кривої (N_e), яку проводять паралельно витраті палива, тобто паралельно абсцисі (точка (С) на графіку). Перпендикуляр, що опущений з точки (С) на абсцису і який перетинає криву g_e в точці (с), і визначає $g_{e\text{м}}$ і $G_{\Gamma\text{м}}$, тобто питому й годинну витрату палива, що відповідають максимальній потужності.

Регулювання на мінімальну питому витрату палива знаходять побудовою дотичної до кривої ефективної потужності, що виходить із початку координат. Точка (В) відповідає мінімальній питомій витраті палива ($g_{e\text{ек}}$), тому що кут (φ) при цьому найбільший, а отже, $\text{ctg}(\varphi)$ найменший, а відомо, що зміна g_e в загальному випадку визначається пропорційно $\text{ctg}(\varphi)$.

У практиці, однак, карбюратори не регулюють на одержання $g_{ек}$ і $g_{ем}$. Звичайно, головну дозуючу систему карбюраторів регулюють на витрати, які трохи перевищують витрати $G_{тек}$. Для визначення цих витрат використовують метод двох дотичних. Цей спосіб полягає в тому, що з початку координат проводять дотичну лінію до лівої гілки графіка N_e (промінь (ОВ) на рис. 2.5) і дотичну лінію до цього графіка, паралельно абсцисі, тобто лінію, що проходить через точку (С). Перпендикуляр, опущений з точки перетинання цих двох дотичних на абсцису, і визначає годинну витрату палива, на яку регулюють карбюратор.

Регульовальні характеристики при незмінному навантаженні, чи постійної потужності двигуна, виражають годинну витрату палива (G_T) у функції витрати повітря (G_B). Положення дросельної заслінки в цьому випадку не фіксують, а вибирають у залежності від витрати палива таким чином, щоб зберегти $N_e = \text{const}$ при $n = \text{const}$.

Визначення регульовальної характеристики при $N_e = \text{const}$ зводиться до наступного. Випробуваний двигун прогрівають і виводять на заданий швидкісний режим роботи. Потім поступово відкривають дросельну заслінку й одночасно збільшують навантаження на двигун до необхідної величини при оптимальному куті випередження запалювання. Змінюють склад суміші, трохи збагачуючи її у порівнянні зі звичайним регулюванням, а режим роботи, що змінився, відновлюють за допомогою дросельної заслінки. Далі, поступово збіднюючи пальну суміш, переходять до наступного виміру поки не наступить порушення безперебійної роботи двигуна. Цілком очевидно, що питома витрата палива при $N_e = \text{const}$ змінюється прямо пропорційно його годинній витраті, тому для оцінки техніко-економічних показників двигуна досить побудувати тільки один графік годинної витрати палива в залежності від годинної витрати повітря (рис. 2.6).

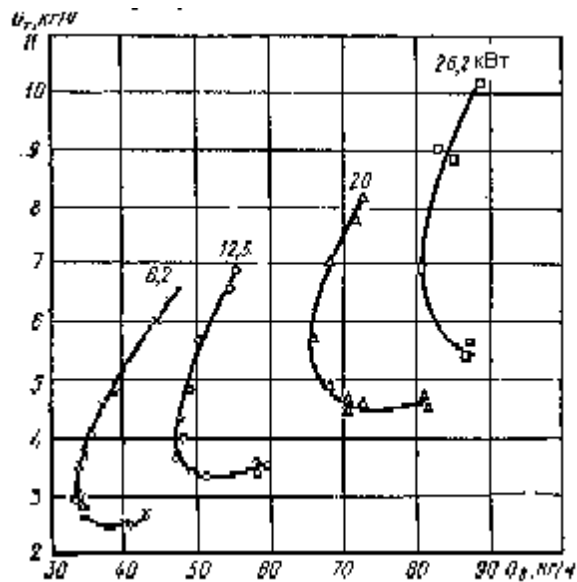


Рисунок 2.6 - Регулювальні характеристики, що визначені при постійних потужності двигуна й частоті обертання колінчастого вала

Для визначення витрат палива, що відповідають максимальній потужності і найкращій економічності, за графіком (рис. 2.6) у першому випадку досить відновити перпендикуляр до абсциси так, щоб він був дотичним до кривої G_t , а в другому - дотична до кривої G_t повинна бути перпендикулярна до осі ординат.

Регулювальні характеристики, визначені при $N_e = \text{const}$, не дозволяють обстежувати режими повних навантажень оскільки можливість маніпуляції дросельною заслінкою дуже обмежені. Тому, регулювальні характеристики при повних навантаженнях можна знімати тільки за способом із фіксованим положенням дросельних заслінок, тобто визначати залежність $N_e = f(G_t)$ при $n = \text{const}$.

Регулювальні характеристики за кутом випередження запалювання являють собою графічне зображення залежності ефективної потужності (N_e) і питомої витрати палива (g_e) від кута подачі електричної іскри в циліндри двигуна при роботі на заданому швидкісному режимі і незмінній витраті повітря. Типова регулювальна характеристика за кутом випередження запалювання представлена на рисунку 2.7.

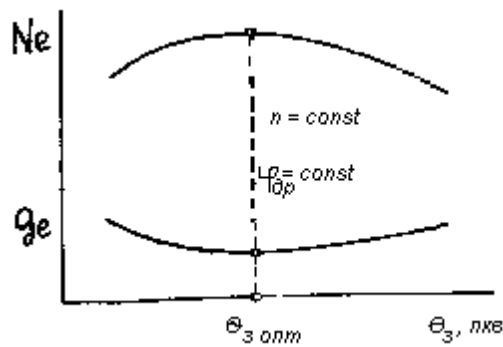


Рисунок 2.7 - Регулювальна характеристика за кутом випередження запалювання

Визначення характеристик за кутом запалювання зводиться до наступного. Двигун, який обладнаний пристроєм для змінювання й фіксування моменту подачі іскри, прогрівають до нормального теплового стану. Далі, шляхом одночасного відкриття дросельної заслінки й регулювання навантаження за допомогою гальма, виводять на заданий режим випробувань. Потім зменшують кут випередження подачі іскри до настання помітного падіння потужності двигуна, що викликає також неминуче зниження частоти обертання колінчастого вала. Щоб відновити прийнятий швидкісний режим роботи, двигун відповідно розвантажують і після необхідного коректування теплового стану роблять потрібні виміри, які включають кут, що визначає момент подачі іскри в циліндрі. Потім на 3...5 град збільшують значення кута (і знову виводять на заданий режим, точно дотримуючи однаковість умов наступних вимірювання, поки знову не настає помітне падіння потужності через занадто раннє запалювання суміші в циліндрі.

Регулювальні характеристики за кутом випередження запалюванню являються вхідними для виявлення антидетонаційних якостей карбюраторних двигунів і оцінки антидетонаційних властивостей палив.

Детонаційні характеристики визначають при повному навантаженні і на чотирьох додаткових швидкісних режимах, які включають мінімальні частоти й частоти обертання вала, що відповідають режиму максимального крутного моменту, при роботі на еталонних сумішах, що мають різні октанові

числа (ОЧ). За результатами випробувань будують графіки $N_e = f(\Theta^0)$, які показані на рисунку 2.8, за якими і визначають первинні детонаційні характеристики, що являють собою залежність кутів випередження запалювання, які відповідають початку детонації. На отриману серію кривих накладають графік оптимальних значень кутів випередження запалювання і по загальних точках досліджуваних графічних залежностей будують результуючу детонаційну характеристику. В даний час токсичність двигунів оцінюють з урахуванням відповідної вагової категорії автомобіля за офіційною методикою, виражаючи її в основному в грамах на випробування, або на одиницю шляху. Рідше оцінюють у % об'єму або в % від маси палива, що витрачається.

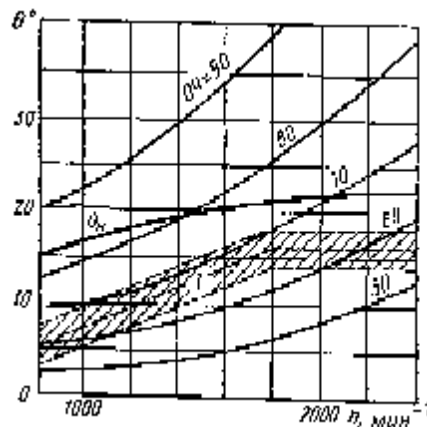


Рисунок 2.8 - Первинна детонаційна характеристика двигуна

2.4 Визначення токсичності відпрацьованих газів двигуна

У країнах Європи всюди застосовують методику, яка рекомендована Європейською економічною комісією (ЄЕК) ООН, що базується на їздовому циклі, який імітує типові умови на трасах міста з інтенсивним вуличним рухом, для яких характерні режими холостого ходу, прискорень і гальмувань. Установлено, що найбільше інтенсивно двигуни забруднюють атмосферу на режимах прискорень автомобіля.

Правила ЄЕК ООН передбачають три етапи контрольних випробувань двигунів, що мають масу 400...3500 кг.

Випробування I проводять за багаторежимним їздовим циклом при температурі $+20...30\text{ }^{\circ}\text{C}$, починаючи від пуску холодного двигуна і роботи його на холостому ході протягом 40 с. Цикл тривалістю 195 с враховує прискорення автомобіля, їзду з різними постійними швидкостями руху, гальмування й переключення передач за визначеним регламентом (рисунок 2.9)

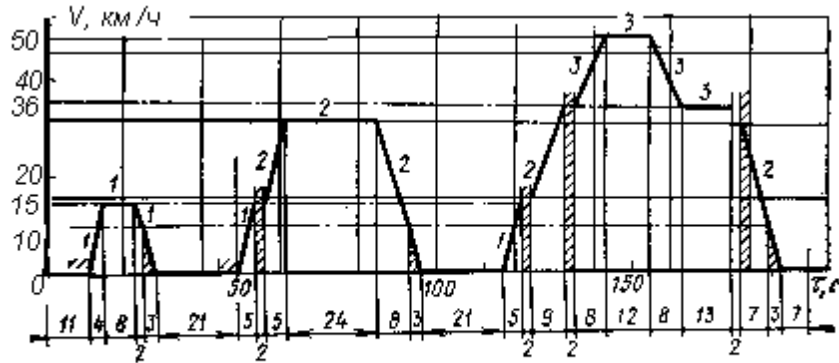


Рисунок 2.9 - Їздовий цикл за правилами ЄЕК ООН

2.5 Випробування на надійність

Випробування на надійність (безвідмовність) регламентуються стандартами на випробування і складаються з послідовно повторюваних циклів - тригодинних для автомобільних і чотиригодинних для тракторних двигунів.

Тригодинний цикл проводять за такою програмою: пуск і прогрівання; холостий хід при $n_{\text{мін}} = 300\text{ хв}^{-1}$ - 5 хв; повне відкриття дроселя, або повна подача палива при $n_{\text{ном}}$ - 2 год 50 хв; холостий хід при $n_{\text{мін}} = 300\text{ хв}^{-1}$ - 5 хв; зупинка - 10 хв.

Чотиригодинні цикли: холостий хід при $n_{\text{мін}}$ - 10 хв; повна подача палива при $n_{\text{Мкр max}}$ - 10 хв; те ж при $n_{\text{ном}}$ - 3 год 30 хв; холостий хід при $n_{\text{мін}}$ - 10 хв; зупинка - 10 хв.

Загальна тривалість таких випробувань повинна складати: для бензинових двигунів легкових автомобілів із літражем до 1 л - 250 год; від 1 до 2.5 л - 300 год; понад 2.5 л - 350 год; для бензинових двигунів вантажних

автомобілів і автобусів із літражем до 2.5 л - 350 год; від 2.5 до 7 л - 400 год; понад 7 л - 450 год; для автомобільних дизелів с літражем до 7 л - 600 год і понад 7 л - 1000 год; для тракторних двигунів - 800 год.

Двигун вважається як таким, що не витримав випробувань на безвідмовність (надійність) у випадку поломок, аварійних заїдань, задирки і небезпечних стуків, для усунення яких потрібно розбирання і ремонт чи заміна основних деталей двигуна в процесі випробувань або після закінчення їх, а також унаслідок зниження потужності й погіршення економічності більш ніж на 5 % від початкових значень, вигорання мастила, що перевищує норми заводу-виготовлювача, чи зниження тиску мастила проти встановленої нижньої межі і підвищеного зносу деталей.

2.6 Методи визначення зносу двигунів

Існуючі методи визначення зносу по їхніх принципових особливостях можна розділити на дві групи:

а) методи, що дозволяють одночасно з визначенням величини зносу виявити розподіл її по поверхні тертя, тобто визначати форму зношеної деталі. До таким відносяться: безпосереднє обмірювання (мікрометраж) деталей, вимір лунок на обстежуваній поверхні і профілографування;

б) методи, що дозволяють визначати тільки кількісну втрату металу з тертьових поверхонь деталей. До таким відносяться: зважування деталей, визначення зносу за концентрацією продуктів зносу в мастилі, або радіоактивних ізотопів, що вводяться до зношуваних поверхонь.

Методи визначення зносу підрозділяються також на: потребуючі повного розбирання двигуна для виконання вимірювання, часткового розбирання, або не потребуючого розбирання.

5. Який порядок визначення характеристики механічних втрат методом вимикання циліндрів?

6. Що собою являє регуляторна характеристика?

7. Як визначається регульовальна характеристика за складом суміші?

8. Що являє собою детонаційна характеристика?
9. Як визначається токсичність відпрацьованих газів, за правилами ЄЕК ООН на етапі II?
10. Який двигун вважається таким, що не витримав випробування на надійність?

ТЕМА 3
ОСНОВНІ ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Математичне планування випробувань ДВЗ

Планування експерименту - це процедура вибору числа й умов проведення випробувань, необхідних і достатніх для рішення поставленої задачі з необхідною точністю.

Найбільш важливими особливостями цієї процедури є:

- 1) прагнення до мінімізації загальної кількості дослідів;
- 2) одночасне варіювання всіма змінними величинами, що визначають поведінку досліджуваного об'єкта, за спеціальними алгоритмами;
- 3) застосування різноманітного математичного апарата, щоб повніше й ширше формалізувати дії експериментатора;
- 4) вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії дослідів;

Щоб абстрагувати конкретні фізичні особливості того чи іншого виду випробувань ДВЗ або їхніх систем, надалі при викладанні курсу будемо використовувати поняття - "об'єкт дослідження", який будемо описувати схемою кібернетичної системи - так називаної "чорної шухляди" (рисунок 3.1)

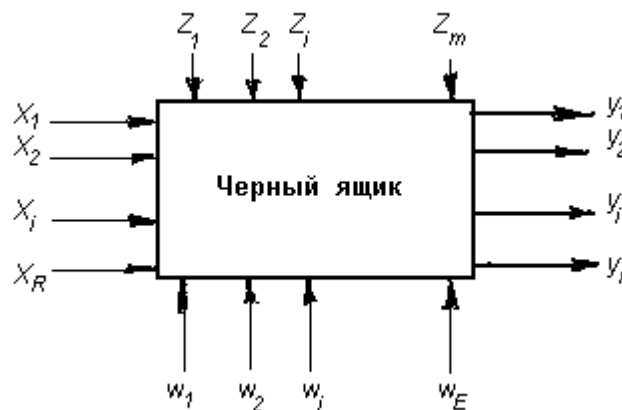


Рисунок 3.1 - Схема "чорної шухляди"

На "вхід" даної системи надходять 3 види впливів: X_1, \dots, X_R ; Z_1, \dots, Z_m ; w_1, \dots, w - "фактори", на які дана система реагує "виходими" - y_1, y_i, \dots, y_n . При реалізації задач оптимізації реакції y_1, y_i, \dots, y_n називають "параметрами оптимізації".

Приведені на рисунку 3.1 безліч діючих факторів X, Z, W принципово відмінні один від одного.

Фактори X - це керуючі впливи. За їх, допомогою реалізується задана робота досліджуваного двигуна, його систем або процесу.

Фактори Z - це група параметрів, що визначають початкові умови випробувань. Це - заздалегідь задані, але некеровані параметри.

Фактори w - це перемінні, але не контрольовані фактори. Вони характеризують впливи, із яких відомо, що вони є, але які, як правило, кількісно оцінити неможливо в ході експерименту.

Кожний керований фактор (X_i) у ході проведення випробувань приймає одне з декількох можливих значень. Такі значення називаються рівнями даного фактора. Фіксований набір рівнів факторів визначає один із можливих станів об'єкта дослідження. Після дослідження усіх можливих сполучень факторів, одержимо повний перелік станів досліджуваного об'єкта. Ця безліч утворить так названу "поверхню відгуку".

Щоб визначити кількість станів, необхідно число рівнів факторів – (p) (якщо вони для усіх факторів однакові) піднести до степеня числа факторів – (k), тобто

$$N = p^k.$$

Зі збільшенням числа факторів величина (N) швидко зростає. Так, для порівняно простої системи з п'яти факторів на п'ятьох рівнях вона дорівнює 3125. Зрозуміло, що таку кількість дослідів проводити нерозумно. І тоді виникає питання: скільки ж необхідно і яких саме дослідів досить здійснити, щоб одержати надійний результат. Цю задачу і покликано в першу чергу вирішити планування експерименту.

3.2 Вибір параметрів оптимізації

Порівняно легко вирішується питання про вибір параметра оптимізації у задачах з одним вихідним параметром. При наявності на виході декількох параметрів, у якості функції, що оптимізується, вибирається будь-яка одна функція, найбільш істотна з точки зору мети дослідження. А інші обмежують вибір параметра оптимізації. Крім того, завжди корисно досліджувати можливість зменшення числа вихідних параметрів, скориставшись кореляційним аналізом.

У випадку оптимізації декількох параметрів часто використовують узагальнену функцію бажаності (функція Харрінгтона), доцільність застосування якої визначається теоретичним й експериментальним матеріалом із даного питання.

3.3 Керуючі фактори

Подібно параметрам оптимізації кожен фактор має область визначення, під якою мається на увазі сукупність усіх значень, що даний фактор може приймати в принципі. У наших задачах завжди вибираються дискретна множина рівнів, навіть у тих випадках, коли фактори мають безупинні області визначення.

У загальному випадку фактори повинні задовольняти наступним основним вимогам:

- 1) фактори повинні мати керованість;
- 2) фактори повинні бути однозначними, тобто впливати на об'єкт випробувань.

Однак при плануванні експерименту, як правило, змінюються кілька факторів. Тому важливо сформулювати вимоги до сукупності факторів. До таких вимог відносять:

- сумісність, під якою мається на увазі принципова можливість необхідних комбінацій факторів і їхня безпека;

- незалежність, тобто можливість устанавлення того чи іншого фактора на будь-якому рівні поза залежністю від рівнів інших факторів.

3.4 Вибір моделі досліджуваної динамічної системи

Під моделлю мається на увазі функція відгуку у вигляді

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_R). \quad (3.1)$$

Вибрати модель означає вибрати вид цієї функції, записати в розгорнутому виді її рівняння. Мінімально необхідна кількість дослідів при цьому повинно бути не менше числа шуканих коефіцієнтів рівняння (3.1). Кожне з обумовлених у результаті експерименту значень (y) у при відповідних значеннях (x) утворить одне з рівнянь системи, у яке перетворюється початкове рівняння (3.1).

При повному переборі факторів рішення, як правило, лінійного рівняння не становить труднощів.

Однак за відмовлення від повного перебору станів досліджуваної динамічної системи, необхідно чимось платити. І платою повинні бути ті припущення, які можна зробити щодо властивостей невідомої нам моделі до початку експерименту, на етапі вибору виду функції (3.1).

Геометрична інтерпретація шуканої моделі - це поверхня відгуку. Однак практично зобразити її ми можемо лише для порівняно простого випадку - 2-х факторної моделі $y = f(x_1, x_2)$. На рисунку 3.2,а показана поверхня відгуку $y = f(x_1, x_2)$, що "спирається" на область визначення (1-2-3-4) факторів (x_1) і (x_2). На рисунку 3.2,б приведена проекція перетинів поверхні відгуку на площину X_1OX_2 у границях тієї ж області визначення факторів (x_1) і (x_2). Лінії I, II, III є еквідистантними один одному. Вони є лініями постійних значень деякого параметра (y), або лініями рівного відгуку. Як правило, щодо шуканої поверхні відгуку передбачається, що вона:

- 1) безупинна;
- 2) гладка (у математичному змісті);
- 3) має єдиний екстремум.

Ці припущення дозволяють представити шукану математичну модель у формі степеневого полінома. Після початку руху з будь-якої точки факторного простору, ми рано чи пізно прийдемо до оптимальної точки. Для цього необхідно визначитися зі способом наближення. На рисунку 3.3 приведені два варіанти пошуку оптимуму для однієї і тієї ж поверхні.

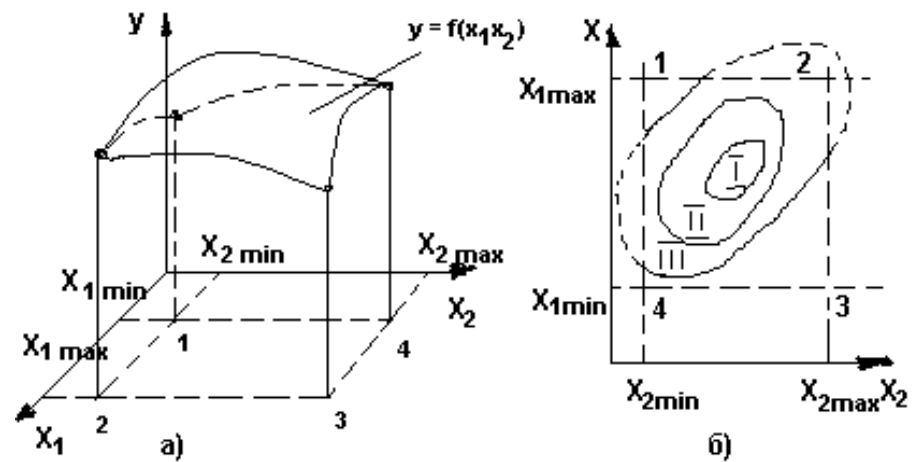


Рисунок 3.2 - Геометрична інтерпретація 2-х факторної моделі

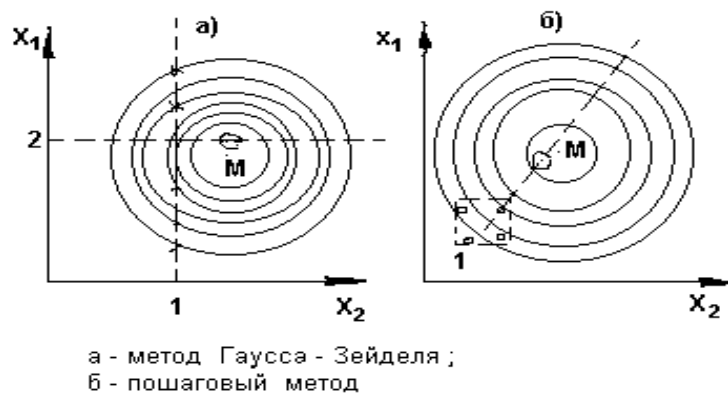


Рисунок 3.3 - Два способи пошуку оптимуму

Метод (а) (метод Гауса-Зейделя) полягає в тім, що спочатку змінюються значення одного фактора. Після знаходження найкращого значення цього фактора, фіксуємо його, і в цих умовах послідовно змінюють значення другого фактора і т.д.(якщо факторів більше двох).

Метод (б) називається покроковим. Спочатку вивчається локальна область 1, потім визначається найбільш сприятливий напрямок. У цьому напрямку продовжується експеримент, поки не буде досягнутий оптимум.

Покроковий метод більш прогресивний, тому що за певних умов оптимум може бути досягнутий при меншому числі дослідів.

Але повернемося до питання, як вибрати модель для першого експерименту. З обраної стратегії випливає, що основна вимога до моделі - її здатність передбачати із заданою точністю напрямки подальших дослідів. Насамперед необхідно визначитися із загальним виглядом рівняння. Тут величезне значення має апріорна інформація про досліджувану динамічну систему. У тих випадках, коли поверхня відгуку задовольняє зазначеним вище вимогам, цілком прийнятною є степеневий поліном. Для випадків із декількома екстремумами більш ефективні тригонометричні поліноми.

3.5 Повний факторний експеримент

Перш ніж почати планувати випробування ДВЗ, необхідно оцінити границі областей визначення факторів. При цьому виникає необхідність врахувати наступні види обмежень на області визначення факторів:

- 1) принципіві обмеження, що не можуть бути порушені ніколи;
- 2) техніко-економічні обмеження;
- 3) специфічні обмеження досліджуваної моделі.

Вибір експериментальної області факторного простору зв'язаний з аналізом апріорної інформації. Найкращим умовам відповідає комбінація рівнів факторів. Кожна комбінація є багатомірною точкою у факторному просторі. Тому її розглядають як початкову точку для побудови плану експерименту. Назвемо її у цьому випадку основним (нульовим) рівнем. Тоді побудова плану

експерименту зведеться до вибору експериментальних значень, симетричних щодо нульового рівня.

У різних випадках експериментатор має різні відомості про область найкращих умов. У цьому зв'язку виникають і розходження в підході при виборі основного рівня. Процес цей можна представити у виді блок-схеми (рисунок 3.4).

Після вибору нульового рівня переходимо до наступного кроку - вибору інтервалів варіювання. Ціль полягає в тім, щоб для кожного фактора вибрати два рівні, на яких він буде варіюватися в експерименті.

Інтервалом варіювання факторів називається деяке число, додаток якого до основного рівня дає верхній, а вирахування - нижній рівень фактора. Для спрощення масштаби по осях вибираються так, щоб верхній рівень був (+1), нижній відповідно (-1), а основний – (0). Для факторів із безупинною областю визначення це завжди можна визначити за допомогою простого перетворення виду

$$x_j = (\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}) / J_j, \quad (3.2)$$

де x_j - кодоване значення фактора j ;

\tilde{x}_j - натуральне значення фактора j ;

\tilde{x}_{j0} - натуральне значення основного рівня фактора j ;

J_j - інтервал варіювання;

j - номер фактора.

На вибір інтервалів варіювання накладаються природні обмеження зверху й знизу. Інтервал варіювання не може бути менше тієї помилки, із яким фіксується рівень фактора; але він не може бути настільки великим, щоб рівні виявилися за межами області визначення.

Озброївшись умінням вибирати основний рівень і інтервали варіювання факторів, вважаємо, що можемо приступити до побудови плану проведення експерименту.

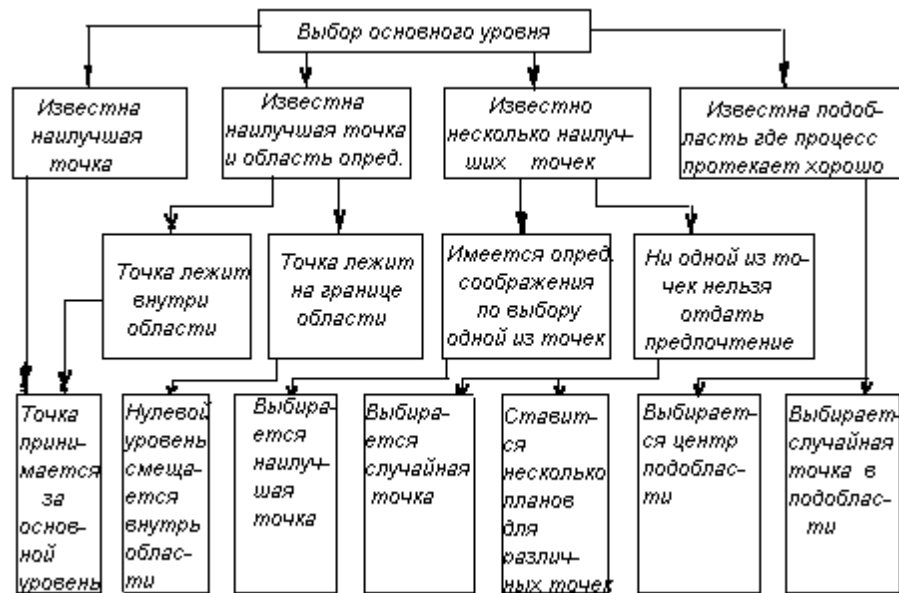


Рисунок 3.4 - Блок-схема принятия решений

Перший етап планування експерименту для одержання лінійної моделі заснований на варіюванні факторів на 2-х рівнях.

У загальному випадку повне число дослідів для (к) факторів

$$N = 2^k. \quad (3.3)$$

Експеримент, у якому реалізуються всі можливі сполучення рівнів факторів, називається повним факторним експериментом. Для двох факторів матриця планування має вид, що приведений у таблиці 3.1

Запис матриці планування для багатьох факторів громіздкий. Для скорочення зручно ввести умовні літерні позначення рядків. У цьому випадку порядковий номер фактора ставиться у відповідність малій літері латинського алфавіту: $x_1 \sim a$; $x_2 \sim b$,... і т.д. Якщо тепер для рядка матриці вписати латинські літери тільки для факторів, що знаходяться на верхніх рівнях, то умови дослідів будуть задані однозначно. Дослід з усіма факторами на нижніх рівнях позначаємо (1).

Таблиця 3.1 - Матриця планування

Номера дослідів	x ₁	x ₂	x ₃	y
1	-1	-1	+1	y ₁
2	+1	-1	-1	y ₂
3	-1	+1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	y ₄

Тоді матрицю 2² можна переписати у вигляді таблиці 3.2

Таблиця 3.2 - Формалізована матриця планування

Номера дослідів	x ₁	x ₂	Позначення рядків	y
1	-1	-1	(1)	y ₁
2	+1	-1	a	y ₂
3	-1	+1	b	y ₃
4	+1	+1	ab	y ₄

При збільшенні кількості факторів виникає необхідність у систематизації способу їх перебору. Звичайно, використовують три прийоми, заснованих на переході від матриці меншої розмірності до матриці більшої розмірності.

3.6 Властивості повного факторного експерименту типу 2^k

1. Симетричність щодо центра експерименту. Воно формулюється так: алгебраїчна сума елементів вектор-стовпця кожного фактора дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^N X_{ji} = 0, \quad (3.4)$$

де j - номер фактора;

N - число дослідів.

2. Виконання умов нормування, тобто сума квадратів елементів кожного стовпця дорівнює числу дослідів

$$\sum_{i=1}^N X_{ji}^2 = N. \quad (3.5)$$

за умови, що значення факторів матриці (+1) і (-1)].

3. Ортогональність, тобто сума добутоків усіх членів будь-яких двох вектор-стовпців матриці дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^N X_{ji} \cdot X_{ui} = 0, j \neq u. \quad (3.6)$$

4. Ротатабільність, тобто такий підбір точок у матриці планування, при якому ймовірність прогнозування значень параметра оптимізації однакова на рівних відстанях від центра експерименту і не залежать від напрямку (X).

3.7 Дробовий факторний експеримент

Кількість дослідів у повному факторному експерименті значно перевершує число обумовлених коефіцієнтів лінійної моделі. При цьому модель має такий вигляд

$$y = b_0 \cdot X_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.7)$$

де X_0 - фіктивна перемінна, у всіх дослідах приймає значення (+1).

Бажано скоротити число дослідів за рахунок тієї інформації, що не дуже істотна при побудові лінійних моделей. Для повного факторного експерименту типу 2^2 модель має вид, приведений у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - матриця планування експерименту 2^2

Номера дослідів	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 \cdot x_2$	y
1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4

Якщо прийняти лінійну модель (парні взаємодії незначні), з'являється одна степінь вільності, коли замість взаємодії $X_1 \cdot X_2$ використовується стовпець для 3-ї перемінної X_3 . Однак, після проведення тільки 4-х дослідів для оцінки впливу 3-х факторів, ми скористалися половиною повного факторного експерименту типу 2^3 . Для позначення дробових реплік, у яких p - лінійних ефектів прирівняні до ефектів взаємодії, прийнято скористатися умовною позначкою виду

$$2^{k-p}. \quad (3.8)$$

Наприклад, при числі факторів 10 дробова репліка $(1/64)$ від 2^{10} має вид 2^{10-6} і тоді число дослідів для дробової репліки складає 16, а для повного факторного експерименту число дослідів дорівнює 1024.

Щоб скоротити число дослідів, потрібно новому фактору присвоїти вектор-стовпець матриці, що належить взаємодії, якою можна зневажити. Тоді значення нового фактора в умовах дослідів визначається знаками цього стовпця.

При побудові напіврепліки типу 2^{3-1} існує 2 можливості:

- 1) X_3 прирівнюється до $(+X_1 \cdot X_2)$;
- 2) X_3 прирівнюється до $(-X_1 \cdot X_2)$.

Тому є тільки 2-і напіврепліки типу 2^{3-1} :

$$I - X_3 = X_1 \cdot X_2 \quad II - X_3 = -X_1 \cdot X_2$$

№ дослідів	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$
1	+1	+1	+1	+1
2	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	-1	+1
4	-1	+1	-1	+1

№ дослідів	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$
1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	-1
3	+1	-1	-1	-1
4	-1	+1	-1	-1

Символічне позначення добутку стовпців, рівного (+1) чи (-1), називається визначальним контрастом. Контраст допомагає визначати змішані ефекти. Для того щоб визначити, який ефект змішаний з даним, потрібно помножити обидві частин визначального контрасту на стовпець, що відповідає даному ефекту. Так, якщо $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = 1$, то для X_1 маємо

$$X_1 = X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3 = X_2 \cdot X_3,$$

так як завжди $X_1^2 = 1$.

Для $X_2 = X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3 = X_1 \cdot X_3$;

Для $X_3 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3^2$.

Це значить, що коефіцієнти лінійного рівняння будуть оцінками:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

Співвідношення, що показує, з яким з ефектів змішаний даний ефект, називається генеральним співвідношенням.

Напіврепліки, в якій основні ефекти змішані з 2-х - факторною взаємодією, звуться планами з можливістю III типу (за найбільшою кількістю факторів у визначальному контрасті). Такі плани позначають

$$2^{3-2}_{III}.$$

Таким чином, при застосуванні дробового планування, потрібно точно знати систему змішування, чітко представляти, яку інформацію прийдеться втрачати.

МЕТРОЛОГІЧНА ЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Загальні визначення

Виміром називають процес перебування фізичної величини шляхом зіставлення з деяким її значенням, прийнятим за одиницю порівняння.

Усі виміри можна розділити на дві групи: прямі і непрямі.

При прямих вимірюваннях значення шуканої величини знаходиться або порівнянням її з конкретною мірою, або за допомогою приладів, градуйованих у відповідних величинах.

При непрямих вимірюваннях значення шуканої величини знаходиться на підставі прямих вимірювання фізичних величин, зв'язаних із шуканою величиною визначеною функціональною залежністю

$$Y = f(x_1, x_2, \dots), \quad (4.1)$$

Для вимірювання застосовуються засоби, в основі роботи яких лежать фізичні закони. Для реалізації тих чи інших принципів вимірювання використовують різні засоби вимірювання.

Сукупність принципів і засобів вимірювання, за допомогою яких вони визначаються, складають метод вимірювання. При випробуваннях ДВЗ використовують методи безпосередньої оцінки, компенсаційний і нульовий.

Метод **безпосередньої оцінки** - це метод, у якому значення вимірюваної величини безпосередньо відраховується на шкалі вимірювального приладу.

У **компенсаційному методі** вимірювану величину порівнюють із величиною відтвореної міри (наприклад, вимірювану напругу постійного струму на компенсаторі порівнюємо з електрорухомою силою (ЕРС) нормального елемента (НЕ)).

У **нульовому методі** дія вимірюваної величини цілком врівноважується дією відомої величини так, щоб їхній взаємний ефект зводиться до нуля. У цьому випадку вимірювальний прилад застосовується лише для установлення факту зрівноважування. Нульовий метод має високу точність, що визначається точністю відтворення зразкової міри й чутливістю нульового приладу.

4.2 Засоби вимірювання

Основними засобами вимірювання є міри, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі і вимірювальні пристрої. **Мірою** називається засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. **Вимірювальним приладом** називається засіб виміру, що виробляє вимірювальний сигнал у формі, доступної для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Вимірювальні прилади підрозділяються на аналогові і цифрові, котрі у свою чергу, можуть бути такими, що показують, чи реєструють. У приладах, що реєструють, передбачений або запис показань на діаграмному папері, або друкування їх у цифровій формі.

У тому випадку, коли необхідно виробити вимірювальний сигнал у формі, зручної для передачі, або обробки для збереження, використовують вимірювальні перетворювачі.

Вимірювальні перетворювачі в залежності від їхніх функцій підрозділяються на первинні перетворювачі (датчики), які тільки перетворюють і передають сигнали, і масштабні, які не тільки перетворюють сигнал, а і змінюють значення вихідного сигналу на задану величину. Вимірювальні прилади, що оснащені вимірювальними перетворювачами, називають вимірювальними пристроями.

Крім згаданих засобів вимірювання у практиці випробувань ДВЗ широке застосування одержують інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), що використовують ЕОМ і дозволяють не тільки робити багатоканальні автоматичні виміри, але й обробляти результати вимірювання за заданими алгоритмами.

Усі існуючі засоби вимірювання у залежності від призначення поділяються на робочі, зразкові й еталонні.

Робочі вимірювальні засоби призначені для практичних вимірювання і, підрозділяються на технічні і засоби підвищеної точності (лабораторні). Зразкові вимірювальні засоби застосовують для перевірки робочих мір, вимірювальних приладів і перетворювачів. Еталонні використовують для відтворення і збереження одиниць фізичних величин із найвищою досяжною точністю на даному етапі розвитку науки й техніки.

4.3 похибки вимірювання

Погрішністю вимірювання називають відхилення результату виміру величини (x) від її істинного значення (x_d). Похибка виміру, виражена в одиницях вимірюваної величини, називається абсолютною погрішністю виміру

$$\Delta = x - x_d. (4.2)$$

Відношення абсолютної похибки виміру до істинного значення величини називається відносною погрішністю виміру. У залежності від причин, що викликали появу похибок, останні прийнято розділяти на систематичні, випадкові й грубі.

Складова похибок виміру, що представляє собою сталу чи помилку, що змінюється за визначеним законом, називається **систематичною погрішністю** вимірювання.

Якщо систематична похибка відома за значенням і за знаком, то вона може бути виключена шляхом внесення виправлення. Звичайно, розрізняють наступні види систематичних похибок: інструментальні, що залежать від похибок засобів вимірювання; методів вимірювання, що залежать від недосконалості методів виміру; методичні, які обумовлені прийнятими

умовами вимірювання фізичної величини, і суб'єктивними, що викликані індивідуальними особливостями експериментатора.

Систематичні помилки можуть істотно спотворити результати вимірювання, однак указати на вичерпні правила відшукування систематичних похибок практично неможливо. У ряді випадків використовують спеціальні способи виключення методичних і інших похибок виміру, і деякі з них будуть розглянуті у відповідних розділах, присвячених вимірам конкретних фізичних величин. Для усунення систематичних інструментальних похибок засобів вимірювання в обов'язковому порядку повинні проходити перевірку в лабораторії мір і вимірювальних приладів.

Складову похибок вимірювання, що змінюється випадковим образом при послідовних вимірюваннях однієї і тієї ж величини, називають випадковою погрешністю вимірювання.

Випадкова похибка виміру не може бути визначена для кожного окремого виміру. Однак при великій кількості послідовних вимірювання фізичної величини випадкові похибки можуть бути кількісно визначені за допомогою теорії ймовірності й методів статистики.

Похибка виміру, яка істотно перевищує очікувану, називається грубою (промахом).

4.4 Метрологічні характеристики засобів вимірювання

Основною характеристикою засобів вимірювання є клас точності, обумовлений межами припустимих основної й додаткової похибок вимірювання. Під межами припустимих основної й додаткової похибок вимірювання розуміють найбільші (без урахування знака) похибки, при яких даний засіб вимірювання може бути допущене до експлуатації.

Варто мати на увазі, що клас точності не є безпосереднім показником точності вимірювання, тому що точність вимірювання залежить ще від методу вимірювання і умов їхнього виконання.

Основна похибка засобів вимірювання визначається в нормальних умовах експлуатації (наприклад, $t = [(20 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}]$, $p = (760 \pm 25) \text{ мм рт. ст.}$). Крім нормальних умов на засоби вимірювання установлюється робоча область зміни фізичних величин, що впливають, у межах якої нормується додаткова похибка.

Приведена похибка вимірювального приладу δ являє собою частку абсолютної похибки у відсотках від значення, що нормує, тобто

$$\delta = \pm 100 \cdot \Delta / x_N. (4.3)$$

Значення, що нормує, для технічних засобів вимірювання приймається рівним діапазону вимірювання (для засобів вимірювання із двосторонньою шкалою - арифметичній сумі верхньої й нижньої меж). У цьому випадку межа припустимої основної похибки показань (δ) збігається з класом (K) засобів вимірювання, тобто

$$\Delta = \pm K \cdot x / 100 = \pm \delta \cdot x / 100. (4.4)$$

Додаткова похибка засобів вимірювання δ_d виражається у вигляді

$$\delta_d = 100 \cdot (x_p - x_{пн}) / x, (4.5)$$

де x_p - показання приладу при робочих умовах;

$x_{пн}$ - показання приладу при нормальних умовах.

Межі припустимої додаткової похибки вказуються або у виді конкретних значень, або у вигляді функціональної залежності δ_d від фактора, що впливає. У деяких випадках (для зразкових і робочих засобів вимірювання підвищеної точності) для виключення систематичної похибки показань вводять виправлення, рівну абсолютної похибки вимірювального приладу.

Виправлення

Під виправленням розуміють значення величини, однойменної з вимірюваної, що додається до отриманого при вимірі значенню величини з метою виключення систематичної похибки

$$x_d = x_n + c,$$

де c - виправлення.

Звідки

$$c = x_d - x_n.$$

З вищевказаної формули видно, що виправлення дорівнює абсолютній похибці вимірювального приладу, узятій зі зворотним знаком.

При перевірці засобів вимірювання виправленнями забезпечуються тільки зразкові засоби вимірювання.

Статична характеристика, коефіцієнт передачі і чутливість засобів вимірювання

Статичною характеристикою засобу вимірювання називають функціональну залежність між вихідною величиною (y) і вхідною величиною (x) у сталому режимі

$$y = f(x). \quad (4.6)$$

Функціональну залежність (4.6) називають також рівнянням шкали приладу, градуйованою характеристикою приладу або перетворювача. Статична характеристика може бути задана аналітично, графічно або у виді таблиці. У загальному випадку лінійна чи лінійна статична характеристика засобу виміру описується рівнянням виду

$$y = a + k \cdot x, (4.7)$$

де a - постійна, що має розмірність (y);

k - коефіцієнт, що має розмірність (y/x).

Коефіцієнт (k), що входить у рівняння (4.7), називають коефіцієнтом передачі.

Але, такі засоби вимірювання, як вимірювальні прилади, характеризують не коефіцієнтом передачі (k), а чутливістю (S).

У загальному випадку, рівняння шкали вимірювального приладу з лінійним зв'язком між вхідною величиною й показаннями має вигляд

$$y = y_n + S \cdot (x - x_n),$$

де (y) і (x) - початкові значення відповідно вхідної й вихідної величин.

Чутливість приладу визначається за формулою

$$S = \frac{y_k - y_n}{x_k - x_n} = \frac{y_{\Delta}}{x_{\Delta}}, (5)$$

де $y_{\Delta} = y_k - y_n$ - діапазон зміни вихідного сигналу;

$x_{\Delta} = x_k - x_n$ - діапазон зміни вхідного сигналу.

Для засобів виміру в більшості випадків краща лінійна статична характеристика. Нелінійні статичні характеристики засобів вимірювання допускаються тільки в тому випадку, якщо вони обумовлені застосуванням принципом виміру і нелінійність не може бути цілком усунута.

Під чутливістю вимірювального приладу з нелінійною статичною характеристикою розуміють межу відношення збільшення вихідного сигналу Δy до збільшення вхідної величини Δx

$$S = \lim \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| = \frac{dy}{dx}. \quad (4.9)$$

Поріг чутливості вимірювального приладу

Під порогом чутливості розуміють найменшу зміну значення вимірюваної величини, яка здатна викликати найменшу зміну показника вимірювального приладу. Поріг чутливості, звичайно, виражають у частках абсолютного значення основної похибки, що допускається, засобом виміру.

Загальні положення про динамічні характеристики засобів вимірювання

При вимірі величин, що міняються в часі, результати виміру можуть виявитися перекрученими, так як крім (статистичних) похибок, що допускаються і похибок, що обумовлені умовами вимірювання, є похибки ще одного виду, що виникають тільки в динамічному режимі виміру, тобто так звані динамічні похибки.

Надалі під динамічною погрішністю засобу вимірювання будемо розуміти різницю між погрішністю засобу вимірювання у динамічному режимі і його статичній похибки, що відповідає значенню величини в даний момент часу.

Якщо вхідна величина виражається функцією $x(t)$, а вихідна величина - функцією $y(t)$, то в кожному мить при відсутності статичних похибок абсолютна динамічна похибка

$$\Delta(t) = y(t) - y_n(t), \quad (4.10)$$

де y_n - вихідна величина "ідеального" у динамічному відношенні приладу, яка дорівнює $y_n(t) = K_x(t)$;

K_x - коефіцієнт передачі "ідеального" приладу.

Надалі будуть розглядатися методи аналізу лінійних динамічних вимірювальних пристроїв, під якими розуміють пристрою, що підкоряються принципу накладення (суперпозиції). Відповідно до цього принципу ефект декількох прикладених до вимірювального пристрою впливів дорівнює сумі ефектів кожного з цих впливів окремо.

У загальному випадку для кількісної оцінки динамічної похибки необхідно знати:

1) закон зміни вхідної величини $x(t)$, що може бути встановлений точно або приблизно на підставі вивчення властивостей контрольованого об'єкта;

2) закон зміни вихідної величини $y(t)$, що залежить не тільки від виду вхідної величини, але і від динамічних властивостей даного засобу вимірювання.

Динамічні властивості засобів вимірювання залежать від внутрішньої структури засобу вимірювання і його елементів.

Для аналітичного опису динаміки лінійних вимірювальних пристроїв в інженерних розрахунках застосовують лінійні диференціальні рівняння виду

$$\begin{aligned} a_n \cdot \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = \\ = b_m \cdot \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \cdot \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \cdot \frac{dx}{dt} + b_0 \cdot x, \end{aligned} \quad (4.11)$$

де a_i і b_j - постійні коефіцієнти ($i = 0, 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, 2, \dots, m$).

Визначення динамічних характеристик засобів вимірювання, звичайно, виконують експериментально, коли на вхід подається стандартний сигнал, а на виході фіксують частотно-амплітудні (ЧАХ) і фазочастотні ФЧХ відхилення від стандарту, а потім отримані результати приводяться до виду (4.11).

5.1 Середні арифметичні і середні квадратичні відхилення

Значення шуканого параметра, що знайдене на основі обмеженого числа дослідів, завжди буде містити елемент випадковості. Таке наближене значення називається **оцінкою** параметра.

Наприклад, оцінкою для математичного чекання служить середнє арифметичне (\bar{x}) значень випадкової величини, що спостерігалися, (x_i) у (n) незалежних дослідах

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n, \quad (5.1)$$

Оцінкою для середнього квадратичного відхилення є статистичне середнє квадратичне відхилення (s) (стандартне відхилення), що представляє собою величину ширини гістограми - кривої розподілу, яка побудована за експериментальними даними

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5.2)$$

обґрунтованими. Крім того, бажано, щоб, при використанні величин (\bar{x}) замість (m) і (s) замість (σ), не виникали систематичні помилки у бік завищення або заниження (такі оцінки називаються незміщеними). Нарешті, обрані незміщені оцінки повинні мати в порівнянні з іншими оцінками мінімальні середні квадратичні відхилення. Оцінки з такими властивостями, називаються ефективними. У зв'язку з цим Гаус запропонував метод найменших квадратів (точніше, мінімуму суми квадратичних помилок). Відповідно закону Гауса,

визначимо ($v_i = x_i - m$) і позначимо квадратними дужками суму по (i) від 1 до n, наприклад

$$[v] = \sum_{i=1}^n v_i, [vv] = \sum_{i=1}^n v_i^2.$$

Для того щоб оцінка для (m) була ефективною, значення

$$[vv] = [xx] - 2 \cdot m \cdot [x] + n \cdot m^2$$

повинно бути мінімальним. Мінімум цього вираження відносно (m) одержуємо шляхом прирівнювання нулю першої похідної

$$-2[x] + 2nm = 0,$$

звідки

$$m = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n = \bar{x}.$$

Отже, зміст середнього арифметичного полягає в тому, що воно дозволяє звести до мінімуму стандартне відхилення.

5.2 Закон поширення помилок за Гаусом

При рішенні різних задач, зв'язаних з обробкою експериментальних даних, нас часто цікавлять випадкові величини, що є функціями інших випадкових величин. Для того щоб визначити стандартне відхилення функції, якщо відомі стандартні відхилення її аргументів, скористаємося законом поширення помилок, запропонований Гаусом

$$s_z = \sqrt{f_x^2 \cdot s_x^2 + f_y^2 \cdot s_y^2 + \dots}.$$

5.3 Зважене середнє

В експериментальних дослідженнях при визначенні середнього арифметичного в більшості випадків має місце вимірювання декількох фізичних величин із не однакою точністю. Для визначення похибок вимірювання у цьому випадку у формулу вводять ваги (w_i), так щоб вимірам більшої точності відповідали більше значення ваги. Тоді середнє арифметичне сформулюється у вигляді

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{[w \cdot x]}{[w]} = \frac{[w \cdot x]}{w_0}, \quad (5.3)$$

де значення (w_0) вважається постійним. Згідно Гаусового закону поширення помилок, стандартне відхилення середнього арифметичного

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{w_0^2} (w_1^2 \cdot s_1^2 + w_2^2 \cdot s_2^2 + \dots + w_n^2 \cdot s_n^2).$$

Ваги вибираються таким чином, щоб ($s_{\bar{x}}^2$) було мінімальним. З останнього рівняння випливає

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{w_0^2} [w_1^2 \cdot s_1^2 + w_2^2 \cdot s_2^2 + \dots + (w_0 - w_1 - \dots - w_{n-1})^2 \cdot s_n^2]. \quad (5.4)$$

Це вираження стає мінімальним, якщо $\partial s_{\bar{x}}^2 / \partial w_i = 0$, тобто

$$2w_i s_i^2 - 2w_n s_n^2 = 0,$$

чи $w_i / w_n = \left(\frac{1}{s_i^2} \right) / \left(\frac{2}{s_n^2} \right).$

Отже, ваги повинні бути обернено-пропорційні квадратам стандартних відхилень.

5.4 Згладжування експериментальних залежностей методом найменших квадратів

Метод згладжування експериментальних залежностей, одержаних у результаті експерименту, розглянемо на конкретному прикладі, коли метою досліду є дослідження залежності деякої фізичної величини (y) від фізичної величини (x). У результаті досліду отриманий ряд експериментальних точок і побудований графік залежності (y) від (x). Звичайно, експериментальні точки на такому графіку мають деякий розкид. Ці відхилення зв'язані з помилками вимірювання.

Виникає питання, як за цими даними щонайкраще відтворити залежність (y) від (x)? У цьому випадку бажано обробити експериментальні дані таким чином, щоб по можливості точно відбити загальну тенденцію залежності (y) від (x) і згладити незакономірні, випадкові відхилення. Для рішення подібних задач, звичайно, застосовується метод найменших квадратів, що дає можливість при заданому типі залежності $y = f(x)$ так вибрати її числові параметри, щоб крива $y = f(x)$ у відомому змісті щонайкраще відображала експериментальні дані.

Для застосування методу найменших квадратів необхідно за допомогою нескладних перетворень придати лінійну математичну форму залежності функції від аргументу.

Нехай мається лінійна залежність

$$y = A \cdot x + B. \quad (5.5)$$

Припустимо, що незалежна перемінна (x) установлюється без помилки. Відповідно до методу найменших квадратів величини (A) і (B) визначаються з припущення про мінімум суми квадратів відхилень (y) від експериментально визначених (y_i), тобто

$$s = \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2 = \min . \quad (5.6)$$

Часткове диференціювання по (A) і (B) дає:

$$\begin{aligned} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)x_i &= -2[xy] + 2A[x \cdot x] + 2B[x]; \\ -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B) &= -2[y] + 2A[x] + 2nB \end{aligned}$$

Прирівняємо нулю обидві похідні й одержимо наступну систему рівнянь:

$$[xx]A + nB\bar{x} = [xy];$$

$$\bar{x}A + B = \bar{y},$$

де $\bar{y} = [y]/n$ і $\bar{x} = [x]/n$, звідки

$$A = \frac{[xy] - n\bar{x}\bar{y}}{[xx] - n\bar{x}^2}; B = \frac{[xx]\bar{y} - [xy]\bar{x}}{[xx] - n\bar{x}^2}.$$

Потім обчислюється значення (s) за формулою (5.5) для знайдених (A) і (B), і позначимо їх (s_{\min}), тоді

$$s_A^2 = \frac{s_{\min}}{(n-2)([xx] - n\bar{x}^2)};$$

$$s_B^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{[xx] - n\bar{x}^2} \right) \frac{s_{\min}}{n-2}, \quad (5.7)$$

є стандартними відхиленнями величин (A) і (B).

5.5 Кореляційний аналіз

Під кореляційним аналізом розуміють дослідження закономірностей між явищами, що залежать від багатьох, іноді невідомих факторів. Якщо дві

перемінні залежать одна від одної так, що кожному значенню (x) відповідає значення (y), то між ними існує функціональний зв'язок. Однак часто між перемінними (x) і (y) існує зв'язок, але не цілком визначена. Одному значенню (x) відповідає кілька значень (y). У цьому випадку зв'язок називають кореляційним. Функція $y=f(x)$ є кореляційною, якщо кожному аргументу відповідає статистичний ряд розподілу функції (y). Отже, кореляційні залежності характеризуються ймовірними зв'язками. Тому встановлення кореляційних залежностей між величинами (x) і (y) можливо лише тоді, коли виконані статистичні виміри. Суть кореляційного аналізу зводиться до визначення випадковості зв'язків між величинами, оцінці тісноти цих зв'язків і вірогідності результатів вимірювання. Щоб попередньо визначити кореляційний зв'язок між (x) і (y), наносять точки на графік і будують так назване кореляційне поле (рисунк. 5.1). По тісноті групування точок навколо прямої або кривої лінії, за нахилом лінії можна візуально судити про наявність кореляційного зв'язку.

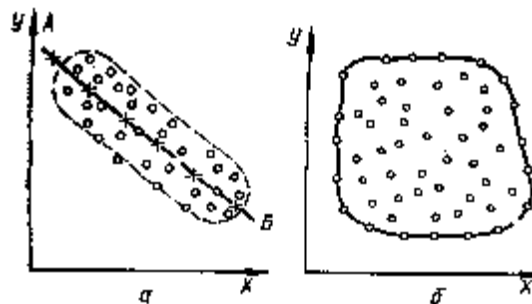


Рисунок 5.1 - Кореляційне поле

Так із рис 5.1,а видно, що експериментальні дані мають визначений зв'язок між (x) і (y). У той же час виміри, що приведені на рис. 5.1 ,б, такого зв'язку не мають.

Кореляційне поле характеризує вид зв'язку між (x) і (y). За формою кореляційного поля можна орієнтовно судити про форму графіка, що характеризує прямолінійну чи криволінійну залежності. Навіть для цілком вираженої форми кореляційного поля внаслідок статистичного характеру

зв'язку досліджуваного явища одне значення (x) може мати кілька значень (y). Тому оптимальної буде така функція, у якій дотримуються умови найменших квадратів

$$\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = \min, (5.8)$$

де y_i - фактичні ординати поля,

\bar{y} - середнє значення ординати за абсцисою (x).

Якщо нанести на кореляційному полі (див. рис. 5.1,а) середнє значення (y) (позначені хрестиками), то лінія (А-Б) буде відповідати функціональній залежності $y = a \cdot x + b$. Середня лінія кореляційного поля, для якого дотримується умова (5.8), називається лінією регресії.

Існує три види кореляції - прямолінійна, криволінійна і множинна. Найбільш розповсюджена прямолінійна кореляція.

Поле кореляції апроксимують рівнянням прямої. Лінію регресії розраховують з умов найменших квадратів (4..37)

$$y = a + b \cdot x. (5.9)$$

При цьому крива (А-Б) (рис. 5.1) щонайкраще відображає значення постійних коефіцієнтів (a) і (b), тобто коефіцієнтів рівняння регресії. Їх обчислюють за вираженнями:

$$b = \frac{n \sum x \cdot y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, (5.10)$$

$$a = y - b \cdot x = \frac{\sum y}{n} - b \cdot \frac{\sum x}{n}. (5.11)$$

Критерієм близькості кореляційної залежності між (x) і (y) до лінійної функціональної залежності є коефіцієнт кореляції (r). Він показує ступінь лінійності зв'язку (x) і (y):

$$r = \pm \frac{(n \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \sum y_i) \cdot \frac{1}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}}{}, \quad (5.12)$$

$$r = \pm \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}; \quad (5.13)$$

$$r = \pm \frac{|\frac{1}{n} \cdot \sum (x_i \cdot y_i)| - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (5.14)$$

де n - число вимірювання;

σ_x , σ_y - середньоквадратичні відхилення.

Незважаючи на громіздкість формули (5.12), вона найбільш проста для обчислень. Значення коефіцієнта кореляції завжди менше одиниці. При (r = 1.0) величини (x) і (y) зв'язані функціональним зв'язком (у даному випадку лінійним), тобто кожному значенню (x) відповідає одне значення (y). Якщо r < 1, то лінійного зв'язку не існує. При r = 0 між (x) і (y) лінійного кореляційного зв'язку не існує, однак може існувати нелінійна регресія. Звичайно, вважають тісноту зв'язку задовільною при r > 0,5; гарним при r = 0,8...0,85.

5.6 Загальні вказівки побудові графіків експериментальних залежностей

Представлення результатів вимірювання у виді графіків експериментальних залежностей додає експериментальному матеріалові велику наочність і широко практикується в експериментах. Графічний аналіз експериментального матеріалу має деякі особливості, які варто враховувати.

Насамперед, для одержання наочного графічного зображення зв'язку між змінними величинами число цих величин повинний бути обмежений.

Найбільш наочними виходять графіки виду $y = f(X)$. Менш наочні, але все-таки досить широко вживані графіки типу $Z = f(x,y)$. При побудові останніх один з аргументів представляється у виді параметра.

Для зменшення кількості змінних вимірюваних величин застосовують методи теорії подібності, коли первинні величини заміняють критеріями або числами подібності.

Далі, графік експериментальної залежності повинний мати високий ступінь вірогідності, для чого необхідно мати на ньому достатнє число експериментальних точок, що, у свою чергу, отримані з деякою погрішністю, і тому спостерігається "розкид" точок. При проведенні експериментальної залежності безпосередньо за експериментальними точками ми одержали б ламану лінію. Оскільки більшість процесів являють собою плавні залежності, прийнято трасувати криві не точно за експериментальними точками, а як можна ближче до усіх точок.

Як правило, не вдається провести плавну експериментальну залежність однаково близько до всіх експериментальних точок, тому деякі з них будуть відстояти від плавної кривої далі інших, як говорять, будуть "випадати". Причини появи точок, що випадають, повинні бути обстежені. Це може бути помилка в обробці експериментальних даних, або помилка у вимірюваннях. Якщо випадають кілька точок і їхня точність істотно не відрізняється від інших, це може служити сигналом про різку зміну фізики процесу, що зостався не заміченим експериментатором, унаслідок малого числа експериментальних точок.

Важливе значення має розміри експериментальних точок. Бажано, щоб розміри точок давали поняття про точність вимірювання. Найбільш правильним варто вважати нанесення точок, діаметр яких дорівнює подвоєній імовірній абсолютній помилці досліджуваної величини.

ТЕМА 6

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

6.1 Загальні положення

Актуальні задачі автоматизації наукових досліджень приводять до необхідності переходу від використання ЕОМ у режимі автономних обчислень до застосування їх як елементів інформаційно-вимірювальних систем. Це пояснюється тим, що:

- сучасний експеримент зв'язаний з необхідністю реєстрації й обробки великих обсягів інформації;
- зросла вартість проведення експерименту на дорогих, унікальних установках, тому необхідні більш ефективні способи обробки експериментальної інформації;
- знизилася вартість малих універсальних ЕОМ;
- ЕОМ дозволяє накопичувати статистичний матеріал, швидко одержувати кінцеві результати і, отже, значно скорочувати час аналізу одержуваних експериментальних даних;
- ЕОМ дозволяє автоматизувати керування експериментом.

Сучасна інформаційно-вимірювальна система складається в загальному вигляді з функціональних блоків (первинних вимірювальних перетворювачів), ЕОМ і засобів сполучення, що забезпечують сумісність функціональних блоків. Інформаційна, енергетична і конструктивна сумісність, а також набір правил, що дозволяють упорядкувати обмін інформацією між окремими функціональними блоками системи, одержали назва інтерфейсу.

Важливою характеристикою інтерфейсу є структура з'єднань функціональних блоків, при цьому можливо два підходи:

- використання спеціальних модулів сполучення;
- уніфікація й стандартизація вхідних і вихідних ланцюгів функціональних блоків.

Основні схеми побудови інформаційно-вимірювальних систем - радіальна і магістральна. На рисунку 5.1 як приклад показана побудова радіальної системи, що складається з наступних функціональних елементів: комутатора аналогових вимірювальних сигналів (КАС), цифрового вольтметра (ЦВ), цифрового частотоміра (ЦЧ) і цифрового обчислювального пристрою (ЦОП) - процесора.

Система здійснює багатоканальні виміри напружень й частот, а також накопичення й обробку результатів вимірювання у ЦОП. При цьому ЦОП за допомогою програмних сигналів (P) у залежності від обраного за програмою каналу задає той чи інший режим роботи ЦВ і ЦЧ. Оскільки цикл виміру чи роботи функціонального елемента продовжується визначений час, що керуючі сигнали (St) наказують підготовку, початок і проведення операцій у функціональному елементі, а також сповіщають про завершення цих операцій. На рисунку 5.1 (Ia) і (Id) - інформаційні аналогові і цифрові сигнали відповідно.

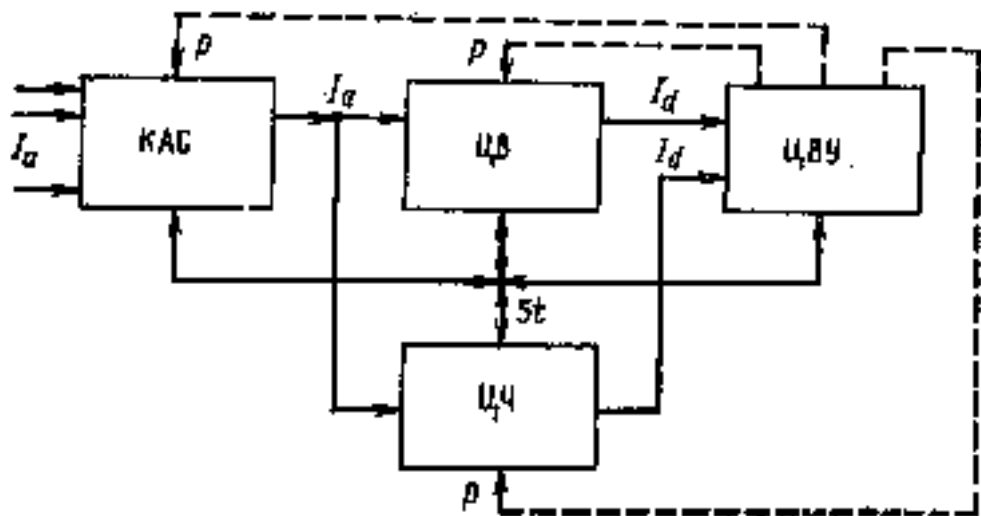
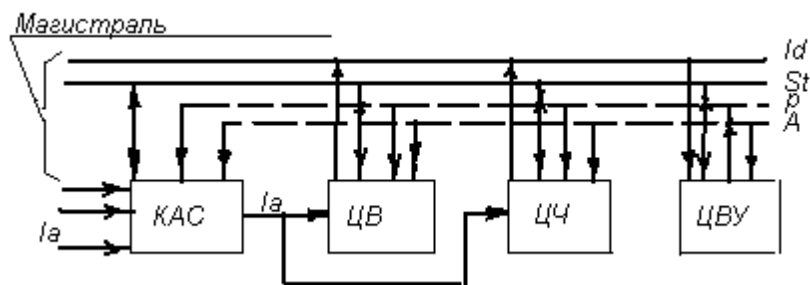


Рисунок 6.1 - Схема радіальної інформаційно-вимірювальної системи

У радіальній системі обмін даними здійснюється безпосередньо між функціональними елементами.

У системах із великою кількістю елементів застосовується магістральна схема обміну даними - схема передачі сигналів магістральними шинами (рис. 6.2).



I_d - вимірювальна інформація; St - керуючі сигнали;

P - програмні сигнали; A - адресні сигнали

Рисунок 6.2 - Схема магістральної інформаційно-вимірювальної системи

Під шинами розуміють провідники (сигнальні лінії), що зв'язують між собою функціональні елементи системи, забезпечуючи обмін однорідними сигналами між ними. Для того щоб розрізнити, до якого з функціональних елементів відносяться сигнали, передані від процесора програмними шинами (P), або яке з пристроїв повинне передати процесорові результати вимірювання інформаційними шинами (I_d), необхідно використовувати адресні сигнали (A).

Зараз випускаються автоматизовані системи випробувань двигунів (АСВД), які дозволяють частково або цілком автоматизувати багато видів вимірювання і навіть деякі типові випробування. Разом із тим у практиці випробувань двигунів використовуються й окремі вимірювальні системи. Такі системи будують іноді за найпростішою схемою з вхідними, проміжними і вихідними ланками прямого перетворення. Однак ці системи мають порівняно малу точність, оскільки похибки окремих ланок складаються.

Щоб підвищити точність вимірювання, застосовують системи зі зворотними зв'язками, які забезпечують вимір за нульовим чи диференціальним методами шляхом електричної компенсації вихідного сигналу, або з датчика, шляхом компенсації неелектричної вимірювальної величини той самою фізичною величиною.

Спосіб компенсації вибирають з урахуванням можливостей датчика. У випадках прийнятної точності датчика можна обмежуватися електричною компенсацією вихідного сигналу з перетворювачами первинної ланки.

Якщо датчик не забезпечує бажану точність, застосовують систему, що компенсує безпосередньо сигнал вхідної неелектричної величини, унаслідок чого через сам датчик проходить лише сигнал дисбалансу між двома однорідними фізичними величинами.

Таким чином, структурна схема системи й точність вимірювання визначаються властивостями й можливостями датчиків, але це не характеризує ще загальний рівень автоматизації вимірювання. Завершується автоматизація кінцевою ланкою системи, що фіксує результати вимірювання, які можуть бути скореговані коефіцієнтами кореляції.

6.2 Датчики

Переважає більшість вимірювання у ДВЗ зв'язано з необхідністю перетворення неелектричних фізичних величин в електричні або безпосередньо, або шляхом попереднього перетворення їх в інші неелектричні параметри. Тому розрізняють датчики непрямого й прямого перетворення, причому останні розділяють ще на параметричні й генераторні.

До параметричних відносять датчики, у яких вхідна неелектрична величина, що діє на ділянку електричного ланцюга, яка живиться від зовнішнього джерела ЕРС, викликає зміну відповідного електричного параметра.

До генераторних відносять датчики, перетворення в яких під дією вхідної неелектричної величини стають джерелом ЕРС. При цьому можуть генеруватися як термо-ЕРС, так і п'єзоелектричний ефект.

При виборі датчика віддають перевагу датчикам, в яких лінійна функція перетворення, тобто такі, що мають лінійну характеристику й які мають велику чутливість, швидкодію і малі габарити. Важливо, щоб датчики не спотворювали

реальність протікання процесу, були надійні і забезпечували реєстрацію спостережень на відстані.

Найбільш розповсюдженими датчиками механічних величин є параметричні, особливо R-датчики.

Датчики опору в найпростішому випадку є датчиками реохордного типу. Ці датчики виконують за схемою реостатів і потенціометрів для порівняно великих переміщень. Застосовують і такі R-датчики, в яких використовується властивості різних тензоопорів.

Тензоопори бувають дротові, фольгові й плівкові. В основі роботи тензоопору лежить зміна активного опору провідників при деформації останніх. Досліди показують, що опір провідників у великому діапазоні змінюється пропорційно силі, що розтягує тензодатчик

$$\Delta R / R = k \cdot P, (6.1)$$

причому зміна опору є пружною і після зняття сили (P) зникає. Оскільки прикладена сила й деформації, що нею викликані, пропорційні, то

$$\Delta R / R = \gamma \cdot (\Delta l / l), (6.2)$$

де γ - константа, називана коефіцієнтом тензочутливості матеріалу, за якою оцінюють чутливість тензодатчиків.

Бажано, щоб тензочутливий матеріал мав у зв'язку з цим можливо менший температурний коефіцієнт опору. Температурні похибки є найістотними. Щоб виключити їхній вплив на показання вимірювального приладу, у ланцюг його послідовно з датчиком включають додатковий опір, підібраний так, що в умовах даних конкретних матеріалів воно компенсує зміну опір датчика при коливаннях температури.

Ємнісні датчики являють собою плоскі конденсатори перемінної величини, у яких зміна ємності пропорційна зміні зазору між пластинами, або ж активні площі цих пластин. Ємність такого конденсатора

$$C = \varepsilon \cdot S / (3.6 \cdot \pi \cdot \delta), (6.3)$$

де ε - діелектрична постійна;

S - площа однієї пластини, м²;

δ - величина зазору між пластинами, м.

Ємнісні перетворювачі з перемінним зазором, звичайно, використовують для виміру малих переміщень, що не перевищують 0.2...0.4 мм. У цьому випадку вони мають лінійну характеристику і малі похибки.

Індуктивні датчики являють собою електромагнітні пристрої, індуктивність яких змінюється під дією вхідної неелектричної величини - переміщення.

Індуктивність (L) електромагнітної системи з котушкою з (ω) витків виражається співвідношенням

$$L = \frac{\omega^2}{R_M} = \frac{\omega^2}{R_{M,CT} + R_\delta} = \frac{\omega^2}{R_{M,CT} + 2 \cdot \delta / (\mu_0 \cdot S)}, (6.4)$$

де R_M - повний опір магнітного ланцюга, А/Вб;

$R_{M,CT}$ - магнітний опір ділянки зі сталі, А/Вб;

R_δ - магнітний опір повітряних зазорів, А/Вб;

δ - величина повітряного зазору, м;

S - площа повітряного зазору, м²;

μ_0 - магнітна проникність повітряного зазору, рівна $1.26 \cdot 10^{-6}$ г/м.

Переміщення, зв'язані зі зміною δ і S , є вхідною величиною перетворювача, а зміна індуктивності його обмотки - вихідної. Лінійна ділянка

характеристики індуктивного перетворювача складає усього 0.1...0.15 від вихідної величини δ_0 повітряного зазору. Щоб збільшити лінійну ділянку характеристики, систему складають із двох перетворювачів і включають їх у сусідні плечі вимірювального мосту. У цьому випадку робоче переміщення зростає до $(0.3...0.4) \cdot \delta_0$. Застосування диференціальних перетворювачів приводе до зменшення похибки вимірювання.

Індукційні датчики відрізняються тим, що мають дві роздільні обмотки; нерухому (ω_1), через яку пропускають постійний струм і рухливу (ω_2). Коли обмотка (ω_2) теж нерухома, то ЕРС на її затисках дорівнює нулю, а у випадку переміщень обмотки (ω_2) під дією вимірюваної неелектричної величини зчеплений з нею магнітний потік (Φ) змінюється і відповідно до закону електромагнітної індукції викликає в обмотці ЕРС

$$e = - \omega_2 \cdot (d\Phi / dt), (6.5)$$

де $d\Phi/dt$ - швидкість зміни магнітного потоку, який взаємодіє з витками обмотки.

Індукційні датчики широко використовують, наприклад, для виміру частоти обертання валів, вібрацій і для інших цілей, зв'язаних із виміром лінійних і кутових переміщень і прискорень.

Робота **п'єзоелектричних датчиків** заснована на принципі п'єзоелектричного ефекту, який полягає в тім, що на деяких кристалах (кварц, турмалін, сегнетова сіль) виникають електричні заряди при стиску чи розтяганні їх у визначених напрямках.

Під дією сили (F_x) виникає заряд

$$q = d_1 \cdot F_x, (6.6)$$

де d_1 - постійний коефіцієнт, називаний п'єзоелектричним модулем.

Для практичних розрахунків визначається величина потенціалу, V

$$U = 21 \cdot (n \cdot F / C), (6.7)$$

де n - число пластин кварцу;

F – сила, що діє на кварц, Н;

C - ємність системи, Ф.

Висока твердість кварцових кристалів дозволяє створювати датчики з частотою власних коливань, рівної 15...25 кГц. Великий питомий опір кварцу $\rho = 2 \cdot 10^{14}$ ом/м змушує висувати підвищені вимоги до сполучного кабелю й підсилювача.

Фотоелектричні датчики базуються на перетворенні енергії світлового потоку в електричну за допомогою різних фотоелементів. За принципом дії розрізняють фотоелементи із зовнішнім і внутрішнім фотоелементом, вентильні і фотопомножувачі.

Світловою характеристикою фотоелементів називають залежність фотоструму (I_Φ) від інтенсивності світлового потоку (Φ): $I_\Phi = f(\Phi)$, що визначає їхню чутливість (s).

Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом являють собою вакуумну чи газонаповнену лампу, катод якої випускає електрони під дією світлового потоку. Фотострум вакуумних фотоелементів прямо пропорційний інтенсивності світлового потоку. Чутливість їх складає 20...100 мкА/лм. При вимірі слабких світлових потоків застосовують фотоелектронні помножувачі ФЕП, дія яких заснована на вторинній електронній емісії. Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом чи фоторезистори працюють на принципі зміни опору деяких напівпровідників під дією світлового потоку. Залежність фотоструму від світлового потоку в більшості фоторезисторів має нелінійний характер, опір залежить від температури і тому їхнє застосування носить обмежений характер. Вентильні фотоелементи являють собою напівпровідникові діоди й тріоди, у яких запірний шар переходів під дією світла стає джерелом струму. Ланцюг із таким фотоелементом не має потребу в додатковому живленні, що можна

віднести до його переваг. Характеристика вентильних фотоелементів нелінійна, вони інерційні, що обмежує їхнє застосування.

6.3 Проміжні ланки вимірювальних систем

У передавальних або проміжних ланках електричних вимірювальних систем сигнали датчика підсилюють, перетворюють і формують з урахуванням особливостей вихідної ланки системи й способу фіксування сигналу. Основними пристроями цієї ланки є підсилювачі, вибір яких визначає структурна схема, прийнята для вимірювальної системи.

Так, у системах із зворотним зв'язком від підсилювачів потрібно висока чутливість, тоді як амплітудні й частотні характеристики і висока сталість коефіцієнта підсилення не мають вирішального значення. Навпаки, у системах прямого перетворення обов'язкова висока стабільність характеристик підсилювача.

У вимірювальних системах застосовують підсилювачі перемінного струму, постійного струму і на несучій частоті. Підсилювачі перемінного струму відрізняються простотою й стабільністю характеристик, але діапазон робочих частот дуже обмежений. Тому вони придатні більше для вимірювання при досить високій частоті нижчої гармоніки досліджуваного процесу (починаючи від 20 кГц) і помірній частоті вищих гармонік (до 8...10 кГц).

Підсилювачі постійного струму відрізняються порівняно широким діапазоном робочих частот (до 200 кГц), але мають недостатньо стабільні характеристики. На стабільність характеристик помітно впливають коливання напруги, температури, вологості, а також із часом нестабільність властивостей деталей самого підсилювача.

Підсилювачі на несучій частоті найбільш універсальні. У блок таких підсилювачів входять генератор несучої частоти (ГНЧ) (0.5...50 кГц), амплітудний модулятор (АМ) (у вигляді мостової чи диференціальної схеми), підсилювач (П) перемінного струму, модулятор посиленних сигналів (МПС), фазочутливий детектор (ФД), що здійснює демодуляцію посиленого сигналу й

одночасно визначає знак збільшення сигналу датчика і фільтр несучої частоти (Φ), після якого сигнал подається на вихідну ланку ($Ук$) (рис. 5.3).

Ефективність підсилювачів даного типу визначається правильним вибором несучої частоти.

Необхідно, щоб несуча кругова частота перевищувала найбільше значення кругової частоти, яка модулюється, не менш ніж у 10...15 разів.

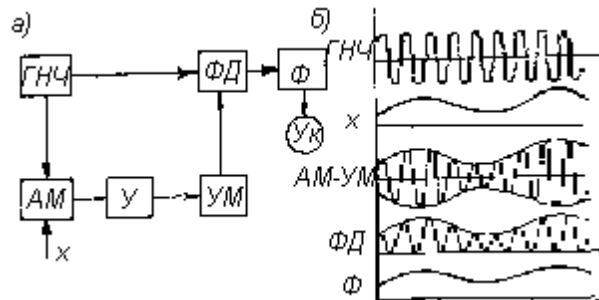


Рисунок 6.3 - Блок-схема (а) і послідовність перетворення (б) сигналів у підсилювачі на несучій частоті

6.4 Вихідні пристрої інформаційних систем

Сигнали від об'єкта дослідження, що були прийняті і перетворені датчиком, а потім посилені й сформовані в проміжних ланках, в останній вихідній ланці системи проходять заключну стадію перетворення у визначений вид інформації з неперервними або дискретними вираженнями. Для інформаційних систем, звичайно, застосовують автоматичну реєстрацію результатів вимірювання, використовуючи на виході пристрої прямого перетворення і цифрові системи дискретної дії.

Принцип прямого перетворення використовують у багатьох універсальних приладах електричної дії якось: самописні вольтметри, гальванометри й логометри, прилади магнітного запису, електричні й електронні осцилографи.

Цифрові системи дискретної дії відрізняються від аналогових тим, що вони обладнані пристроями, які виконують кодування й декодування сигналів, робота яких заснована на механічних, електромагнітних і електронних

елементах. Такі системи діють за релейним принципом методами механічного друкування, перфорації, фотографії і т. і.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

7.1 Визначення потужності двигуна

Ефективну потужність N_e , кВт, тобто потужність, що відбирається від колінчастого вала двигуна і поглинається тим чи іншим зовнішнім опором (гальмом), визначають шляхом виміру крутного моменту, $M_{кр}$, що виробляється двигуном при даній частоті обертання (n) його вала

$$N_e = M_{кр} \cdot \omega = M_{кр} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (7.1)$$

де ω - кутова швидкість обертання вала двигуна, c^{-1} .

Гальмовий пристрій виконують таким чином, щоб можна було виміряти крутний момент, що виробляється двигуном. Так момент тертя $M_{тр}$, що діє на ротор механічного гальма і дорівнює крутному моменту $M_{кр}$ (Н·м) двигуна, врівноважують вагою (P), кг, яку підвішують на визначеному плечі (l), м, (рис. 7.1)

$$M_{кр} = M_{тр} = 9.81 \cdot P \cdot l.$$

Тоді потужність двигуна, кВт

$$N_e = \frac{9.81 \cdot \tau \cdot l}{1000} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{9.81 \cdot l \cdot \pi}{30 \cdot 10^3} \cdot P \cdot n = k \cdot P \cdot n, \quad (7.2)$$

де k -постійна гальма, яка визначається за формулою

$$k = \frac{9.81 \cdot \pi \cdot l}{30 \cdot 10^3} = \frac{l}{974}.$$

Величину (k) обов'язково вказують у паспорті гальма. Щоб полегшити процеси вимірювання і визначення потужності двигуна, довжину плеча (l) гальма вибирають кратній величині 974, тобто $l = 0,974$ м, тоді $k = 0.001$.

Гальмові пристрої, що поглинають механічну енергію, яка виробляється двигуном, перетворюють її безпосередньо в теплову, чи в будь-який інший, легко вимірюваний вид енергії.

Найбільш відомі механічні, гідравлічні, електричні, індукторні й повітряні гальма. Гальма з корпусом, що має балансірне кріплення, часто називають балансірними машинами або гальмовими динамометрами.

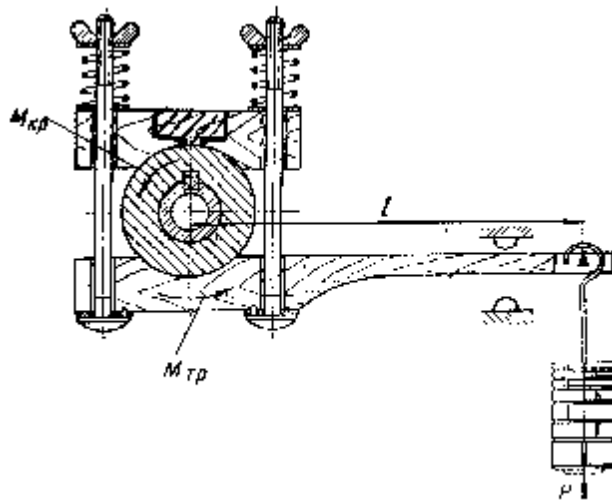


Рисунок 7.1 - Принципова схема найпростішого гальма

Незалежно від пристрою й принципу дії бажано, щоб гальмові установки забезпечували:

- 1) гальмування двигуна в широкому діапазоні відносного його завантаження на всіх розрахункових швидкісних режимах роботи;
- 2) стабільне гальмування, коли гальмовий момент не змінюється визначений термін;

- 3) стійке гальмування, коли заданий швидкісний режим зберігається у випадку невеликих короточасних змін навантаження;
- 4) точний вимір крутного моменту;
- 5) прокручування колінчастого вала двигуна, тобто можливість його прокручування від стороннього джерела енергії;
- 6) корисне використання енергії, яка була вироблена двигуном у процесі гальмування;
- 7) дистанційне керування пристроями, що регулюють навантаження двигуна;
- 8) порівняно низький рівень шуму.

При випробуваннях автотракторних двигунів, звичайно, застосовують гідравлічні й електричні гальмові установки.

При всіх різноманітні гальм основу їхньої конструкції складають ротор, що обертається разом із валом двигуна, і статор, що має можливість переміщатися навколо осі ротора при його балансірній підвісці.

Невід'ємною частиною гальмових пристроїв є прилади, що вимірюють зусилля чи крутний момент, що виробляється двигуном. Ці прилади із системою їх специфічних передавальних і перетворюючих ланок і складають устрій, що називається динамометром.

7.2 Вимір крутного моменту

Момент працюючого двигуна визначають або шляхом виміру рівного йому моменту реакції статора гальма, або шляхом виміру кута закручування сполучного вала під дією переданого моменту.

Для визначення величини крутного моменту використовують різні механічні, гідравлічні й електричні динамометри. Структурна схема їх складається з первинної, проміжної і вихідної ланок.

Механічні динамометри виготовляють у вигляді важеля з маятником, рідше з пружинними вагами.

Динамометр, який складається з важелів із металевими вагами схематично показаний на рисунку 6.2.

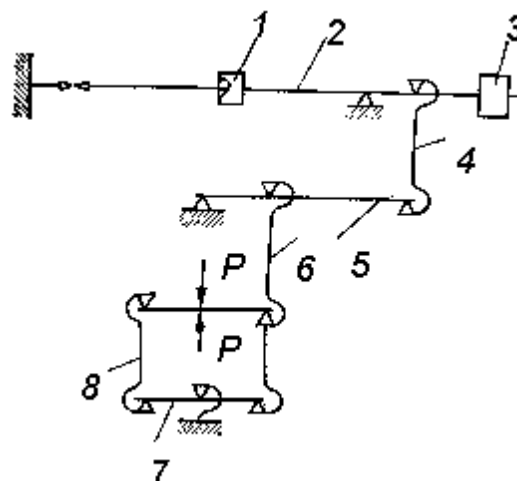


Рисунок 7.2 - Схема динамометра з важелями й вагами

Оскільки такі ваги не реверсивні, те в проміжній ланці динамометра передбачають спеціальний реверсивний пристрій, що працює таким чином. Коли сила (P), прикладена до важеля гальма, спрямована вгору, вона діє на тягу 8, через важіль 7 і зусилля передається на тягу 6, переміщує її вниз, і через важіль 5 і тягу 4 навантажує коромисло ваг 2. Коли сила (P) спрямована вниз, то вона минає реверсивний пристрій, безпосередньо діє на тягу 6 у тім же напрямку, і навантажує коромисло ваг незалежно від напрямку обертання ротора гальма. Вага 3 забезпечує зрівноважування коромисла ваг при положенні гирі 1 на нульовому розподілі її шкали, а зрівноважування сили (P) і визначення її величини досягається шляхом переміщення гирі 1 на коромислі. Точність і чутливість важільних ваг значно перевершують вимоги щодо точності, однак надійність і маневреність цих ваг недостатня. Тому в лабораторіях перевагу віддають точним і не таким чуттєвим, але більш надійним, швидкодіючим і стабільним у відношенні показань маятниковим вагам.

Схема основної ланки **маятникового динамометра** показана на рисунку 7.3. Маятникові ваги не спотворюють показань під впливом залишкових

деформацій, як, наприклад, пружинні, а так як вони реверсивні, то це дозволяє вимірювати навантаження при будь-якому напрямку обертання ротора гальма. Так як маятниковим вагам властиво поглинати незначні коливання, маятник не спотворює відліку при випадкових коливаннях навантаження, що притаманне важільним вагам.

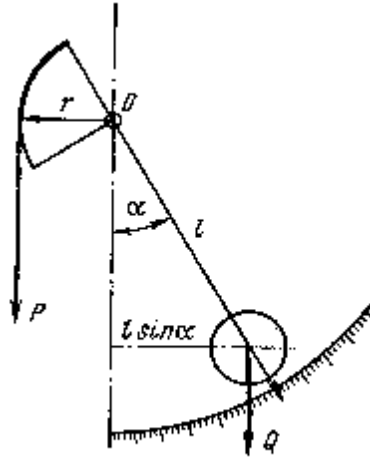


Рисунок 7.3 - Принцип дії маятникового динамометра

Принцип дії маятникового вагового пристрою наступний. На важелі довжиною (l) підвішена вага (Q), що разом із сектором радіусом (r) може обертатися навколо осі (O). До сектора, який виконаний у формі квадранта, за допомогою стрічкової тяги прикладається вимірювана сила (P). Очевидно, що система прийде до рівноваги, коли момент від сили (P) буде дорівнює моменту від сили (Q) відносно центру обертання (O)

$$P \cdot r = Q \cdot l \cdot \sin(\alpha), \quad (6.3)$$

або

$$P = \frac{1}{r} \cdot Q \cdot l \cdot \sin(\alpha) = c \cdot \sin(\alpha),$$

де c - постійна, що залежить від конструкції механізму.

Однак у такому найпростішому виконанні маятниковий механізм не зовсім зручний, тому що має нерівномірну шкалу відліку і відносно високі

втрати на тертя. Існують різні способи коректування шкали, (наприклад, профілювання сектора-квадранта за законом $r = \alpha \cdot \sin(\alpha) / \alpha$, приймаючи (α) за вхідну величину, зниження втрат на тертя (застосування шарикопідшипників), проте похибка вимірювання досягає ± 1 %, що обмежує їхнє застосування межами типових випробувань.

Динамометри з ваговою голівкою в порівнянні зі звичайними маятниковими мають більшу точність виміру (похибка не перевищує 0.1...0.2 %) і досить чуттеві, що дозволяє застосовувати їх при виконанні науково-дослідних робіт.

Основу таких динамометрів складає вагова голівка, найчастіше двомаятникова, у сполученні з важільними вагами з реверсивним пристроєм. У сутності динамометри з ваговою голівкою являють собою механізм із важільними вагами, до коромисла яких приєднана циферблатна вагова голівка.

Електричні динамометри в загальному випадку являють собою прилади, у яких деформація пружного елемента викликає зміну визначеного електричного параметра, покладеного в основу виміру крутного моменту. На практиці при випробуваннях двигунів частіше використовують вимірювальні перетворювачі, в основі роботи яких лежить зміна омичного опору, ємності, індуктивності, або фотоефекта під дією вхідної неелектричної величини. Вхідною величиною може бути: скручування сполучного вала гальмової установки, кутове переміщення деталей вимірювальних муфт чи деформація пружного елемента, так названого динамометричної ланки, на які діє важіль гальма.

Звичайно, використовують спосіб, зв'язаний з виміром кута закручування сполучного вала (торсіонні динамометри).

Торсіонні динамометри базуються на відомій закономірності між кутом закручування вала і крутним моментом, що діє на вал

$$\varphi = [1 / (G \cdot J_{\delta})] \cdot M_{кр}, (7.4)$$

де l - відстань між двома перетинами вала, поворот яких відносно один одного вимірюється, м;
 G - модуль зрушення матеріалу вала, МН/м²;
 J_p - полярний момент інерції перетину вала, м⁴.

Для вала круглого перетину діаметром (d) ця залежність має вигляд

$$\varphi = [32 \cdot l / (\pi \cdot d^4 \cdot G)] \cdot M_{кр} \approx [10 \cdot l / (d^4 \cdot G)] \cdot M_{кр},$$

звідки випливає, що кут закручування вала в межах пружних деформацій пропорційний крутному моменту, який діє на вал. Так як величина дотичного напруження в зовнішніх шарах вала визначаються крутним моментом, $M_{кр}$, і зв'язана з ним залежністю

$$\tau = 16 \cdot M_{кр} / (\pi \cdot d^3), \quad (7.5)$$

то максимально припустимий кут закручування вала визначається як

$$\varphi_{\max} = (2 \cdot \tau_{\text{доп}} / G) \cdot (l / d). \quad (7.6)$$

Для вимірювальних валів застосовують сталі, що допускають високі дотичні напруження, і це дозволяє збільшувати кут закручування цих валів до 4...5 град на довжині $10 \cdot d$.

У залежності від способу виміру кута закручування вала розрізняють: торсіонні динамометри, механічні, оптико-механічні й електричні. Найбільш широке застосування для цих цілей знаходять електричні виміри за допомогою різних тензодатчиків.

ТЕМА 8
ВИМІР ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ І ЧАСУ

8.1 Загальні положення

При випробуванні двигунів припускають погоджені виміри швидкості обертання колінчастого валу й часу. Обидві величини необхідно фіксувати одночасно з точністю, що допускається приладами, які обрані для проведення випробувань.

Кутова швидкість (ω) обертального руху об'єкта за числом його обертів у хвилину визначається за формулою

$$\omega = \pi \cdot n / 30. \quad (8.1)$$

Так як між кутовою (ω) і лінійною (V) (м/с) швидкостями точки, що розташована на відстані (r) від осі обертання, існує залежність

$$V = r \cdot \omega,$$

то

$$V = \pi \cdot r \cdot n / 30. \quad (8.2)$$

У практиці випробувань лінійну швидкість часто визначають через кутову швидкість обертання відповідного валу, яку вимірюють приладами двох типів: тахометрами, що показують безпосереднє число обертів у хвилину, і сумарними лічильниками, що фіксують число обертів за визначений відрізок часу. Крім цих базових приладів застосовують тахографи і тахоскопи, у яких механізми визначення швидкості обертання й часу механічно пов'язані і являють собою єдиний вимірювальний пристрій.

Час вимірюють механічними й електричними секундомірами. Останні мають широку універсальність.

8.2 Тахометри, тахоскопи і тахографи

Тахометри відносяться до аналогових диференціальних механізмів. За принципом їхньої дії розрізняють: відцентрові, електричні, магнітні, електронні, стробоскопічні, хронометричні, пневматичні, гідравлічні, фрикційні, вібраційні й ін.

Тахометри, як і інші вимірювальні прилади, складаються з трьох ланок: датчика (приймача), передавальної ланки й показчика.

Відцентрові тахометри найбільш прості в експлуатації, надійні, але не мають потрібну точність і недостатньо стабільні в роботі. Робота відцентрових тахометрів заснована на використанні відцентрової сили тягарців, що з'єднані шарнірно з приводним валом. На рисунку 6.9 приведена схема відцентрового тахометра з кільцем 3, що своєю віссю 2 шарнірно закріплене на валу 1, а тягою 6 шарнірно з'єднаний з муфтою 5, що має можливість переміщатися по валі 1. Навколо осі 2, що несе вантажне кільце, навита вимірювальна спіральна пружина 4, що врівноважує момент від відцентрової сили інерції маси кільця, що виникає внаслідок обертання вала.

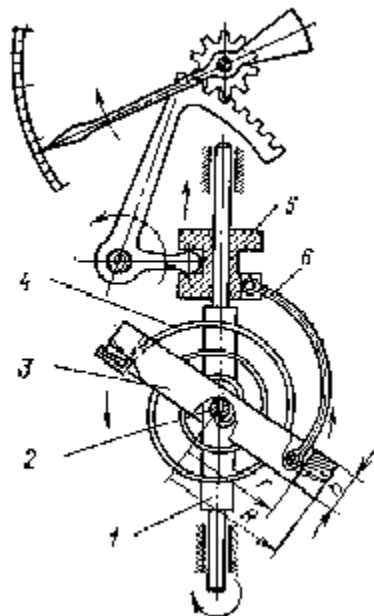


Рисунок 8.1 - Відцентровий тахометр

Шкалу покажчика відцентрових тахометрів, звичайно, градуують за допомогою зразкових тахометрів і вибирають її так, щоб відношення верхньої межі шкали до нижньої складало 4 і не перевищувало 6. Мала кратність шкали наближає її до рівномірної. похибки відцентрових тахометрів складають 1...8 %, причому більші з цих значень відповідають режимам роботи з відносно малою частотою обертання.

Електричні тахометри досконаліше відцентрових. Конструкція електричних тахометрів полягає в наступному: до вала випробовуваної машини приєднують датчик, що являє собою динамо-машину постійного чи перемінного струму, а напругу струму, що вироблюється при роботі, вимірюють за допомогою вольтметра чи частотоміра, шкала яких градуйована безпосередньо в числах обертів вала. Електричні тахометри мають високу точність, допускають потрібну в практиці дистанційність вимірювання і дозволяють підключати до датчика ряд покажчиків.

Магнітні тахометри працюють за принципом використання обертового магнітного поля й дії на розташований у ньому немагнітний циліндрик. Принципова схема такого тахометра показана на рисунку 8.2.

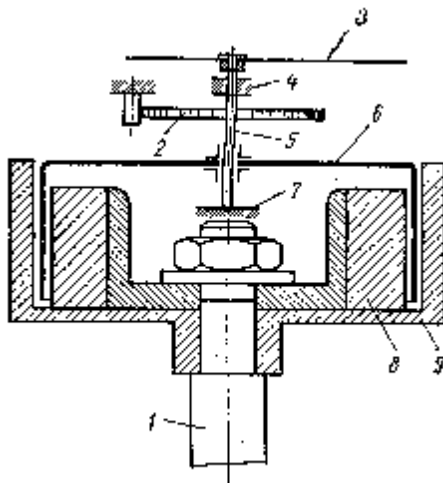


Рисунок 8.2 - Магнітний тахометр

На валі 1, що підключається до двигуна, закріплений постійний магніт 8, концентрично з яким на своїй осі 5 розташований легкий циліндрик 6

з алюмінію. Вісь циліндрика обертається на підшипниках 4 і 7. Вісь 5 несе стрілку 3, положення якої при вимірюванні фіксується вимірювальною пружиною 2, другий кінець якої закріплюється до нерухомої опори. При обертанні магніт 8 створює обертове магнітне поле, силові лінії якого перетинають циліндрик і як у провіднику збуджують у ньому вихрові струми. Створюване цими струмами магнітне поле взаємодіє з магнітним полем магніту 8 і призводить до виникнення при цьому крутного моменту, який відхиляє циліндрик 6 на деякий кут, що пропорційний силі, із яким полюси постійного магніту притягають циліндрик. Так як крутний момент пропорційний частоті обертання, то шкала такого приладу рівномірна, що є їхньою перевагою. похибки магнітних тахометрів не перевищують 1...2 %. Крім рівномірності шкали, вони відрізняються так само простотою конструкції.

Недоліки магнітних тахометрів полягають у чутливості їх до температурних змін і деякій з часом нестабільності напруженості магнітного поля постійного магніту.

Стробоскопічні тахометри працюють за принципом, що зорове відчуття не зникає миттєво. При середній освітленості предметів тривалість зорової пам'яті складає 1/15...1/20 с. Якщо зорові роздратування впливають одним за одним із перервами менш зазначених, то відчуття від предмета не встигає зникати з нашої свідомості, незалежно від того, чи знаходиться він у стані руху або спокою.

Стробоскопічний ефект використовують для вимірювання, коли потрібно визначати дуже великі швидкості обертання валів і відсутня можливість підключення до досліджуваного об'єкта звичайного тахометра.

За способом одержання потрібного для спостереження пульсуючого потоку світла тахометри цього типу розділяють на стробоскопічні й електростробоскопічні. Найчастіше використовують другий спосіб. Для цієї мети застосовують без інерційні газові неонові лампи, що забезпечують чітке висвітлення досліджуваного об'єкта. Похибка вимірювання таким тахометром не перевищує $\pm 1\%$.

Принципова схема електростробоскопічного тахометра показана на рисунку 8.3.

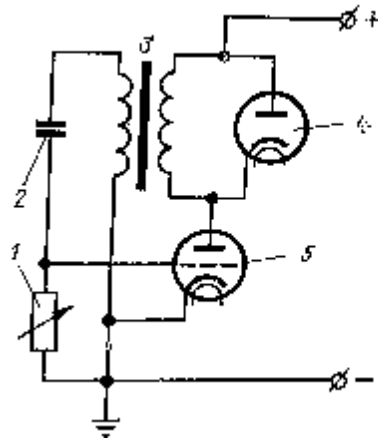


Рисунок 8.3 - Принципова схема електростробоскопічного тахометра

Коливальна система його складається з електронної лампи 5, трансформатора 3, конденсатора 2 і резистора 1. Частота коливань задається контуром із конденсатора 2 і резистором 1. Газова лампа 4 включена в ланцюг анода лампи рівнобіжного трансформатора 3. Крім стробоскопічних тахометрів застосовують різні електронні імпульсні пристрої.

Електронні тахометри працюють з індукційними чи фотоелектричними вхідними перетворювачами. Приладами, що реєструють, є електронні частотоміри, що діють за принципом заряду-розряду конденсатора або за іншими схемами з цифровою індикацією результату.

Електронні тахометри не поступаються точністю електричним, магнітним і стробоскопічним, а навіть перевершують кращі з них.

Тахоскопи засновані на спільній роботі лічильника обертів і годинного механізму, що автоматично підключає й відключає стрілочний показчик приладу при обертанні його приводного вала. Тахоскопам годинного типу властива висока точність, що складає частки відсотка. Тому вони служать як контрольні прилади.

Тахографи являють собою прилади, що складаються з відцентрового тахометра і годинного механізму, які забезпечують у процесі виміру безупинний запис значень кутової швидкості на діаграмній стрічці. Тахографи

застосовуються при дослідженні прискорення двигуна, тобто динаміки зростання частоти обертання його вала.

8.3 Вимір часу

При випробуваннях вимір часу здійснюється механічними або електричними секундомірами. Особливо широко застосовують електричні секундоміри, в основі роботи яких використовують або синхронні двигуни, або електронні імпульсні лічильники-частотоміри.

Частотоміри працюють за принципом дискретного рахунка імпульсів генераторів зразкової частоти (ГЗЧ), що дозволяє вимірювати час із точністю, яка на кілька порядків перевищує точність виміру інших фізичних величин. Такі частотоміри відрізняються високою універсальністю і, не дивлячись на різноманіття їхніх конструкцій, мають аналогічні блок-схеми, приклад якої показаний на рисунку 8.4.

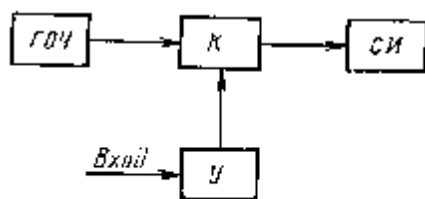


Рисунок 8.4 - Блок-схема рахунково-імпульсного хронометра

Основу блок-схеми складають: генератор зразкової частоти (ГЗЧ), безконтактний ключ (К) і лічильник імпульсів (ЛП). Сигнали, що надходять на вхід, після посилення в підсилювачі (У) і формування сигналу на виході йдуть на вхід безконтактного ключа (К). Стартовий сигнал переводить ключ у положення "замкнута", і з цього моменту коливання генератора (ГЗЧ) надходять на вхід лічильника імпульсів (ЛП) доти, поки зупинний сигнал імпульсного хронометра не переведе ключ у положення "розімкнута". Тому рахунок коливань генератора ведеться тільки в межах вимірюваного інтервалу часу.

В окремих випадках доцільно буває застосовувати механічні секундоміри. Контрольні секундоміри цього типу з балансом, що робить 180...360 тис. коливань у годину, дозволяють вимірювати час із точністю 0.02...0.01 с. При випробуваннях ДВЗ частіше застосовують звичайні секундоміри з балансом, що робить 18 тис. коливань у годину, із точністю визначення часу 0.2 секунди. Такі секундоміри більш портативні, зручні в роботі і забезпечують точність відліку, цілком достатню для практичних цілей.

ТЕМА 9

ЗАСОБИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ

Вимір температури ґрунтується на явищі теплообміну між вимірником температури й тілом. Т. ч. про температуру тіла можна судити по зміні якої-небудь фізичної властивості робочої речовини вимірника температури. Одиницею температури є градус Кельвіна (К) чи градус Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). Між температурами t ($^{\circ}\text{C}$) і T (К) установлена відповідність

$$t = T - 273.15. (9.1)$$

За принципом дії термометри розділяються на механічні, електромеханічні й електричні.

До **механічних** відносять термометри, дію яких засновано на тепловому розширенні твердих і рідких тіл, на зміні тиску газів або рідини і її пари у замкнених системах, що викликає механічне переміщення покажчика або зміну тиску, яке в подальшому перетворюється у механічне переміщення покажчика, пропорційно нагріванню. Найбільш поширені в цій групі рідинні й манометричні термометри.

До **електромеханічних і електричних** відносять різноманітні термометри опору, у яких використовують властивості провідникових і напівпровідникових терморезисторів, термометри з напівпровідниковими діодами й тріодами, а також термоелектричні термометри, що дозволяють вимірювати тепловий стан середовища за допомогою зміни термоелектрорушійної сили в термопарі.

9.1 Рідинні термометри

Скляні рідинні термометри широко поширені в практиці виміру температури внаслідок досить високої точності й простоти вимірювання. Для заповнення термометрів використовують ртуть, толуол, етиловий спирт і т. і.

Скляні рідинні термометри підрозділяються на: термометри широкого застосування, без уведення виправлень до показань: ртутні (-35...+600 °С), рідинні (-185...+300 °С); термометри підвищеної точності, до показань яких вводять виправлення відповідно до показання шкали.

В основному виготовляють термометри двох типів: трубчаті і з вкладеною шкалою. Термометри з вкладеною шкалою більш інерційні, але більш зручні для спостережень.

У залежності від методу градування скляні термометри під час виміру температури або занурюють у вимірюване середовище, або до відлічуваного розподілу, або до визначеної риски. Якщо за якимись причинами зробити цього немає можливості, то в показання термометра вносять виправлення, що враховує вплив джерела додаткової похибки

$$\Delta t = n \cdot \beta \cdot (t - t_{\text{вс}}), \quad (9.2)$$

де n - висота виступаючого стовпчика в розподілах шкали;

$\beta = 0.00018$ - коефіцієнт видимого об'ємного розширення ртуті, K^{-1} ;

t - температура, що визначена під час виміру термометром, °С;

$t_{\text{вс}}$ - середня температура виступаючого стовпчика, °С.

Варто помітити, що виправлення на виступаючий стовпчик може бути визначена з погрішністю не нижче ± 10 %. Таким чином, якщо необхідно визначити точне значення температури, то варто використовувати більш точний метод.

9.2 Термоелектричні вимірники температури (термопари)

Термометри застосовуються для виміру температур у діапазоні від (-200) до (+2500) °С. Вони мають досить високу точність і можуть бути використані в автоматизованих системах збору й обробки експериментальних даних.

В основу термоелектричного методу виміру температури покладений ефект Зеєбека, суть його полягає в тім, що в розімкнутому ланцюзі, складеної з двох різних і термоелектричними однорідними провідниками, спаї яких поміщені в середовище з різними температурами, виникає термо-ЕРС, пропорційна різниці температур спаїв. Таким чином, термо-ЕРС термопари $E_{AB}(t, t_0)$ дорівнює різниці контактних термо-ЕРС $e_{AB}(t)$ і $e_{AB}(t_0)$

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), (9.3)$$

де t і t_0 - температури спаїв, $^{\circ}\text{C}$.

Звичайно, t_0 підтримується сталою, рівної 0°C , тому рівняння (9.3) при $t_0 = \text{const}$, має вигляд

$$E_{AB}(t, t_0) = F(t). (9.4)$$

Залежність (9.4) може бути знайдена під час тарування термопари методом порівняння її показань із показаннями зразкового вимірника температури.

У практиці виміру температур у повітряному й нейтральному середовищах широке поширення одержали термопари, виготовлені з неблагородних металів і їхніх сплавів, унаслідок їхньої низької вартості і досить високої чутливості. Основним недоліком термопар із неблагородних металів є те, що для їхнього виготовлення практично важко одержати термоелектричним однорідний дріт, а отже, і забезпечити гарну відтворюваність стандартної тарувальної кривої.

Хромель (89 % Ni + 9.8 % Cr + 1 % Fe + 0.2 % Mn) - копелєві (56 % Cu + 44 % Ni) термопари (ТХК) мають найбільшу термо-ЕРС у порівнянні з іншими термоелектричними вимірниками температури, але порівняно невисока верхня межа тривалого використання ($500\text{...}600^{\circ}\text{C}$) у повітряному середовищі.

Хромель-алюмелеві (94 % Ni + 2 % Al + 2.5 % Mn + 1 % Si + 0.5 % домішки) термопари (ТХА) мають більш високу температурну межу (1000 °С), але меншу термо-ЕРС.

Платинородій (90 % Pt + 10 % Rn) - платинові (100 % Pt) термопари (ПП). Термопари ПП застосовуються для виміру температур 300...1600 °С в окисному і нейтральному середовищах. Вони мають найбільшу точність і використовуються як еталонні вимірники температури з припустимою погрішністю, що дорівнює $\Delta E_t = 0.01 + 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot (t - 300)$, мВ, у діапазоні температур 300...1600 °С.

Виправлення на температуру холодного спаю

Під час тарування термопар температуру холодного спаю, звичайно, підтримують рівної 0 °С. Однак при випробуваннях ДВЗ температура холодного спаю t' буває постійна, але не дорівнює 0 °С, що викликає необхідність уведення виправлення. У цьому випадку значення термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$, за якою визначається температура тарувальної кривої, знаходиться з рівняння

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) \pm E_{AB}(t'_0, t_0), \quad (9.5)$$

де знак “плюс” відповідає випадку $t'_0 > t_0$, а знак “мінус” - випадку коли $t'_0 < t_0$.

Включення вимірювальних приладів у ланцюг термопари

Для включення в ланцюг термопари вимірювального приладу 4 (рис. 9.1) необхідно або розірвати один з термоелектродів (а), або розірвати холодний спай термопари (б). При вимірі за схемою (б) холодні кінці 2, звичайно, з'єднують із мідними провідниками і розміщують у пробірці з мастилом, яку, у

свою чергу, занурюють на глибину 100...150 мм у судину Д'юара з льодом, який плаває у воді.

Похибки виміру температури термопарами

Припустиме відхилення виміру температури термопарою може бути зменшене шляхом тарування термопари. Однак, дійсна похибка виміру температури в багато разів більше.

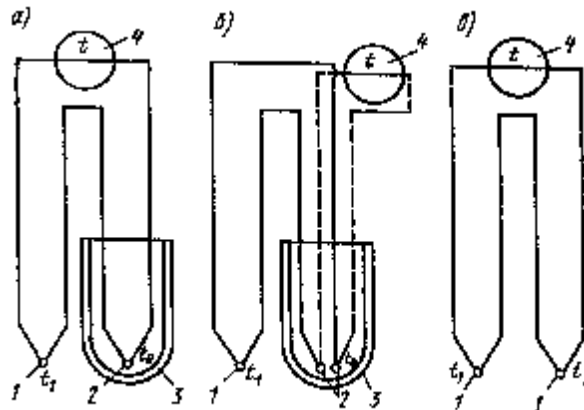


Рисунок 9.1 - Схема включення вимірювального приладу у ланцюг термопари

Справа полягає в тім, що умови роботи термопари відрізняється від умов її тарування. Тому, унаслідок наявних термоелектричних неоднорідностей електродів і різних механічних ушкоджень дроту виникають додаткові термо-ЕРС, значення яких неможливо заздалегідь передбачити. Унаслідок зазначених причин точність виміру температури в діапазоні 400...500 °С не вище ± 1.5 °С, а в діапазоні 800...900 °С не вище $\pm 3...4$ °С.

Точність виміру поверхні залежить також від способу закріплення робочого спаю термопари, який необхідно щільно з'єднати з поверхнею теплообміну зварюванням, пайкою або приклеюванням для забезпечення рівності температури робочого спаю термопари й поверхні теплообміну (рис. 9.2). Однак навіть у цьому випадку може мати місце методична похибка, яка

з'являється із-за порушення істинного розподілу температури в місці установки робочого спаю термопар за рахунок відводу частини теплоти уздовж електродів.

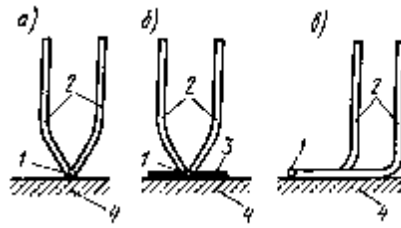


Рисунок 9.2 - Способи з'єднання гарячого спаю термопар з поверхнею

Спосіб, що показаний на рисунку 9.2 (а) є найбільш несприятливим. Установка металевої пластини (рис. 9.2, б) з матеріалу з високою теплопровідністю приводить до зменшення перекручування температури в місці закладення внаслідок збільшення контактної поверхні. Методична похибка може бути зведена до нуля, якщо електроди термопар, як показано на рисунку 9.2 (в) будуть укладатися уздовж поверхні теплообміну на довжину $(150...200) \cdot d$.

Вимір термо-ЕРС термопар мілівольтметрами

Принцип дії мілівольтметра заснований на використанні сили взаємодії між постійним струмом, що протікає по обмотці рухливої рамки, і магнітним полем постійного магніту (рис. 9.3).

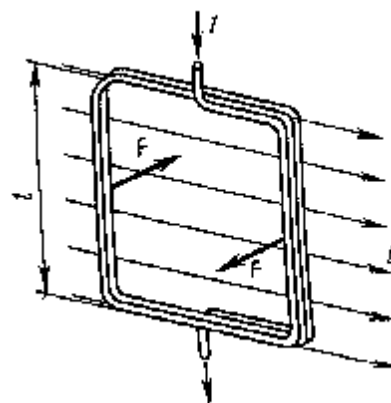


Рисунок 9.3 - Рамка в магнітному полі

Сила, що діє на кожну сторону рамки, відповідно до закону Біо-Савара

$$F = I \cdot n \cdot B \cdot m, (9.6)$$

де I - сила струму, А;

m - активна сторона одного витка, м;

B - магнітна індукція, Вб;

n - число витків.

Схема з'єднання мілівольтметра з термопарою показана на рисунку 9.4.

Напруга на затисках мілівольтметра

$$U_{AB} = E_{AB}(t, t_0) - U_{ab} \cdot (R_{вн} / R_m), (9.7)$$

де $E_{AB}(t, t_0)$ - термо-ЕРС, мВ;

$R_{вн}$ - зовнішній опір, що включає опір термопари і

додаткового резистора R_y , Ом;

R_m - внутрішній опір мілівольтметра, Ом.

Таким чином, напруга на затисках мілівольтметра завжди менше термо-ЕРС на значення падіння напруги в зовнішньому ланцюзі. У свою чергу, падіння напруги U_{ab} тим менше, чим більше внутрішній опір мілівольтметра. Тому для збільшення точності виміру термо-ЕРС мілівольтметри повинні бути високоомними з малим власним споживанням потужності.



Рисунок 9.4 - Схема з'єднання мілівольтметра з термопарою

На стабільність показань мілівольтметра істотно впливає зміна температури навколишнього середовища, що приводить до зміни струму в ланцюзі приладу. Для зменшення цього ефекту в ланцюг мілівольтметра включають додатковий резистор R_y з манганіну, температурний коефіцієнт електричного опору якого дорівнює нулю.

Вимір термо-ЕРС потенціометрами

Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС за допомогою потенціометра заснований на зрівноважуванні вимірюваної термо-ЕРС відомою напругою, створюваною стабільним джерелом постійного струму (нормальним елементом - НЕ). Таким чином, на відміну від мілівольтметра в момент виміру струм у ланцюзі потенціометра відсутній, а отже, і відсутнє перекручування вимірюваної термо-ЕРС. На рисунку 6.17 показана принципова схема потенціометра з постійною силою робочого струму. Для встановлення робочого струму (I) перемикач (П) установлюють у положення (К). У цьому випадку нормальний елемент (НЕ) буде послідовно з'єднаний з контрольним резистором (R_k) і нульовим приладом (НП). Тік у компенсаційному ланцюзі регулюється резистором (R_1) доти, поки падіння напруги на (R_k) не стане рівним напрузі нормального елемента $E_{не}$. У цьому випадку стрілка нульового приладу

встановлюється на нульовій відмітці шкали, а робочий струм у ланцюзі буде дорівнювати

$$I = E_{не} / R_k, (9.8)$$

Потім перемикач (П) установлюють у середнє положення, а повзунок реостата (R_p) - у положення, що приблизно відповідає вимірюваній термо-ЕРС.

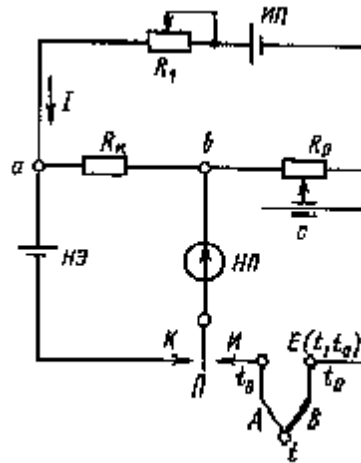


Рисунок 9.5 - Схема потенціометра з постійною силою робочого струму

Після цього перемикач (П) установлюють у положення (У) і рухають повзунок реостата доти, поки нульовий прилад знову не установиться на нульовій відмітці шкали, тобто

$$E(t, t_0) = I \cdot m \cdot R_p. (9.9)$$

де

$$m = R_p' / R_p. (9.10)$$

R_p' - частина опору реостата, зліва від повзунка (С).

Підставляючи (9.8) у (9.9), остаточно знайдемо

$$E(t, t_0) = E_{не} \cdot m \cdot (R_p / R_k). \quad (9.11)$$

Таким чином, при вимірі термо-ЕРС потенціометром у ланцюзі термопарі відсутнє падіння напруги, а отже, і переключування термо-ЕРС.

9.3 Термометри опору

Термометри опору знаходять широке застосування в практиці виміру температур у діапазоні від (-260) до (+750) °С, а в окремих випадках і до (+1000) °С. Принцип дії термометрів опору заснований на ефекті зміни електричного опору провідників зі зміною температури.

Найбільш придатним матеріалом для виготовлення термометрів опору є чисті метали (Pt, Cu, Ni і ін.). У загальному випадку структурна схема електричних термометрів складається з трьох ланок (рис. 9.16).

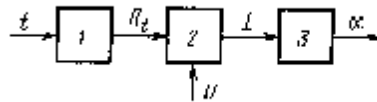


Рисунок 9.16 - Структурна схема електричного термометра

У ланці 1, що представляє собою звичайний або напівпровідниковий датчик цього приладу, вимірювана температура (t) перетворюється в зміну омичного опору (R_t). У ланці 2 вимірювального ланцюга резистор (R_t) викликає зміну електричного струму (I). У ланці 3, що являє собою електровимірювальний прилад (потенціометр, логометр і т.д.), струм (I) перетворюється в кутове відхилення (α) стрілки покажчика, шкала якого градуйована в (mA) або безпосередньо в (°C). Для живлення схеми служить стороннє джерело з напругою (U).

Вимогам до матеріалів датчиків термометрів опору відповідають також об'ємні напівпровідникові терморезистори - термістори, що представляють

собою суміш із порошкоподібних окислів Mn_2 , Cu_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni і ін., спресовану й спечену при високій температурі.

У техніці виміру температур знаходять також застосування напівпровідникові діоди й тріоди.

9.4 Вимір температур в ємностях і потоках

У реальних умовах виміру температур завжди можливо деяка розбіжність між температурою вимірюваного середовища й температурою датчика приладу, що занурюється в неї. Ця різниця і складає при цьому помилку вимірювання. Величина її залежить від: способу розміщення датчика у вимірюваному середовищі, теплопровідності матеріалу, випромінювання тепла поверхнею датчика і його теплової інерції, а також від швидкості й характеру руху потоку.

Похибки виміру, пов'язані з теплопровідністю матеріалу датчика й способом установки його в потоці, що має однакову температуру у всіх точках, але таку, що відрізняється від температури місця встановлення датчика, визначають на підставі рівнянь теплопровідності

$$\Delta t = t_d - t = (t_0 - t) / \operatorname{ch}\left[\ell \sqrt{\alpha_T \cdot \Pi / (\lambda \cdot f)}\right], \quad (9.12)$$

де t_d , t і t_0 - відповідно температура кінця датчика, середовища, у яку він занурений, і місця встановлення датчика, $^{\circ}C$;

ℓ - довжина зануреної частини датчика, м;

Π і f - периметр і площа поперечного переріза датчика відповідно, м і m^2 ;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу датчика, $Вт/(м \cdot K)$;

α_T - коефіцієнт теплопередачі від середовища до датчика, $Вт/(m^2 \cdot K)$;

ch - гіперболічний косинус.

Аналіз формули дозволяє визначити, що втрати внаслідок теплопровідності можна зменшити шляхом: виготовлення захисного чохла для

датчика з матеріалу з малим значенням (λ); збільшення глибини занурення (ℓ) датчика і підвищення значення коефіцієнта (α_T); зменшення площі (f) перетину захисного чохла до розмірів, що обмежуються механічною й міцністю трубки і застосування теплової ізоляції місця встановлення датчика з метою підвищення температури датчика (t_0) у цьому місці.

На практиці передбачають найбільш можливу глибину занурення датчика у вимірюване середовище і встановлюють його проти потоку, а трубопровід у зоні розміщення датчика покривають теплоізоляційним матеріалом (рис. 9.7). Зі способів розміщення датчиків у трубопроводі, показаних на рисунку 9.7, кращі варіанти (а) на прямолінійній ділянці і (б), якщо останній має коліно. Спосіб (в) менш ефективний, але простий за виконанням і тому його застосовують більш широко.

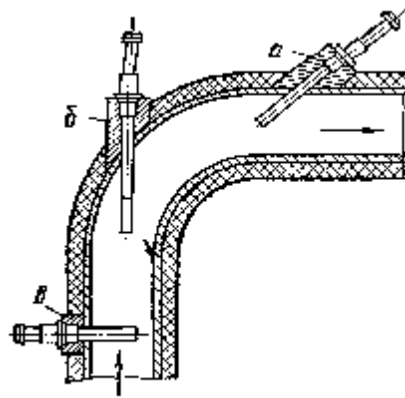


Рисунок 9.7 - Установка датчика температури в трубопроводах

Похибки виміру через променистий теплообмін між датчиком і стінками трубопроводу виникають унаслідок різниці температури нагрівання стінок і температури потоку, що протікає у трубопроводі

$$\Delta t = (c/\alpha_T) \cdot [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \quad (9.13)$$

де T_1 і T_2 - абсолютні температури датчика й стінок труби, К;
 α_T - коефіцієнт теплопередачі від середовища до датчика, Вт/(м²·К);
 c - приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²·К⁴)

$$c = , \quad (9.14)$$

c_1 і c_2 - коефіцієнти випромінювання поверхонь датчика й стінок трубопроводу, Вт/(м²·К⁴);
 c_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;
 F_1 - площа датчика, м²;
 F_2 - площа трубопроводу, через яку випромінюється теплота з поверхнею датчика, м².

Для зменшення похибок, пов'язаних із променистим теплообміном, трубопровід утеплюють накладенням на його стінки шару теплової ізоляції, або введенням екрана між датчиком і стінками трубопроводу. На практиці прагнуть також зменшити вплив коефіцієнтів (c_1) і (α_T). Величина (c_1) залежить від матеріалу датчика і якості обробки його поверхні. Для полірованих поверхонь датчика (c_1) значно нижче, ніж для шорсткуватих.

Похибки виміру температури в потоках, що рухаються з великою швидкістю, виникають через неминуче часткове гальмування потоку в області розташування термоприймача, що викликає додаткове його нагрівання. Практично термоприймач, встановлений у потоці газу, завжди показує температуру (t'_3), відмінну від температури потоку (t) і температури гальмування (t_3), тому що газ, який обтікає термоприймач, загальмовується тільки частково. Отже

$$t'_3 = t + r \cdot [\omega^2 / (2 \cdot c_p)], \quad (9.15)$$

де r - коефіцієнт відновлення, що має величину менше одиниці;
 ω - швидкість потоку, м/с;
 c_p - питома теплоємність газу при $P = \text{const}$, Дж/(кг·К).

ТЕМА 10

ЗАСОБИ ВИМІРУ ТИСКІВ

10.1 Загальні положення

У практиці вимірювання тиску розрізняють абсолютний, атмосферний, надлишковий і вакуумметричний тиск.

Абсолютний тиск дорівнює сумі надлишкового й атмосферного тисків, МПа

$$p = p_i + p_0. \quad (10.1)$$

Якщо абсолютний тиск менше атмосферного, то такий тиск називається вакуумметричним, МПа

$$p_v = p_0 - p. \quad (10.2)$$

У Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею тиску є Паскаль (Па). З метою скорочення числа значущих цифр використовують також кратні одиниці (1 МПа дорівнює 10^6 Па; 1 кПа дорівнює 10^3 Па). Використовуються також несистемні одиниці тиску: технічна атмосфера (ат), що рівняється 1 кгс/см^2 ; міліметр водяного стовпа (мм. вод. ст.) і міліметр ртутного стовпа (мм. рт. ст.), віднесені до нормальних умов: для води - це до $4 \text{ }^\circ\text{C}$, для ртуті - до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ і нормального прискорення вільного падіння, що дорівнює 9.80665 м/с^2 .

Тиск рідин і газів в ємностях і потоках вимірюють різними приладами, що називаються манометрами. За призначенням прилади вимірювання тиску розділяють на манометри мастила, води, повітря, кисню і т. і., а за принципом дії їхніх чуттєвих елементів, передавальних ланок та показчиків - на механічні й електричні.

Вибір потрібних приладів вимірювання тисків визначається прийнятою методикою дослідження, бажаною точністю виміру й діапазоном вимірюваних

тисків. Цим цілям цілком відповідають звичайні рідинні й пружинні прилади різних модифікацій.

10.2 Рідинні манометри

Рідинні манометри, які називають також п'езометрами, у найпростішому виконанні представляють U-подібні скляні трубки (рис. 10.1). Внутрішній діаметр трубки повинний бути не менш 8...10 мм, тому що при меншому діаметрі починають виявлятися капілярні властивості рідини. Як робочу рідину, звичайно, застосовують воду. Надлишковий тиск (Па), що вимірюють за допомогою U-подібного манометра, підраховується за формулою

$$p_{\text{и}} = g \cdot h \cdot (\rho - \rho_{\text{с}}), \quad (10.3)$$

де g - прискорення вільного падіння, м/с²;

h - різниця рівнів рідини, м;

ρ - густина рідини, кг/м³;

$\rho_{\text{с}}$ - густина середовища над робочою рідиною, кг/м³.

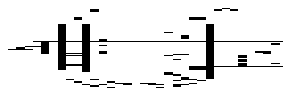


Рисунок 10.1 - U-подібний манометр

Точність відліку показань U-подібного манометра неозброєним оком з урахуванням похибки виготовлення шкали, звичайно, не перевищує ± 2 мм стовпа робочої рідини. Для підвищення точності відліку зразкові U-подібні манометри забезпечуються дзеркальною шкалою.

10.3 Мікроманометри

Для виміру малих перепадів тиску повітря або неагресивних газів використовують мікроманометри (рис. 6.21).

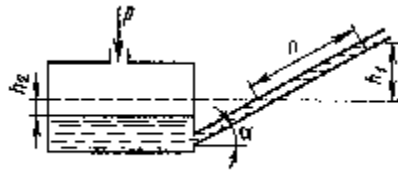


Рисунок 10.2 - Мікроманометр із похилою трубкою

Як робочу рідину використовують етиловий спирт. Різниця висот рівнів робочої рідини врівноважує вимірюваний тиск і дорівнює

$$h = h_1 + h_2 = n \cdot \sin(\alpha) + h_2. \quad (10.4)$$

Якщо F_1 і F_2 - площі перетинів похилої трубки й судини, то внаслідок рівності об'ємів $n \cdot F_1 = h_2 \cdot F_2$, висота стовпа буде дорівнювати

$$h = n \cdot (\sin(\alpha) + F_1 / F_2).$$

Отже, надлишковий тиск (P_a), що вимірюється мікроманометром дорівнює

$$p_i = h \cdot g \cdot \rho \cdot (\sin(\alpha) + F_1 / F_2). \quad (10.5)$$

Для більш точних вимірювання малих перепадів тисків використовують мікроманометри з оптичним пристроєм і мікроманометри компенсаційного типу.

Виправлення до показань рідинних манометрів

При точних вимірюваннях тисків рідинними манометрами необхідно враховувати похибки, пов'язані з впливом температури й прискорення вільного падіння на показання приладів.

Якщо (h_t) - вимірювана висота стовпа робочої рідини манометра при температурі (t), то висота стовпа (h_0) при температурі $t_0 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ для води буде дорівнювати

$$h_0 = h_t \cdot [1 - \beta \cdot (t - t_0) - \alpha \cdot (t - t_{20})], \quad (10.6)$$

де $t_{20} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тому виправлення до показання приладу на температуру варто обчислювати за формулою

$$\Delta h_t = h_0 - h_t = h_t \cdot [\alpha \cdot (t - t_{20}) - \beta \cdot (t - t_0)], \quad (10.7)$$

де β - середній коефіцієнт температурного розширення рідини, рівний 0.0002 K^{-1} для води;

α - лінійний коефіцієнт температурного розширення матеріалу шкали, $\alpha = 0.000019 \text{ K}^{-1}$ для латуні, 0.000012 K^{-1} для сталі, 0.000008 K^{-1} для скла.

Виправлення на значення місцевого прискорення вільного падіння визначають за формулою

$$\Delta h_d = h_t \cdot (g / 9.806 - 1). \quad (10.8)$$

Значення висоти рідини, що приведені до нормальних умов, обчислюється за формулою

$$h_0 = h_t + \Delta h_t + \Delta h_d.$$

10.4 Манометри з пружними чуттєвими елементами

У практиці виміру тиску в діапазоні від 50 до 1000 МПа широке поширення одержали прилади, принцип дії яких заснований на використанні пружної деформації чуттєвих елементів, що сприймають тиск середовища.

Манометри з одновитковою трубчастою пружиною

На рис. 10.3 показана конструкція манометра з трубчастою пружиною Бурдона.

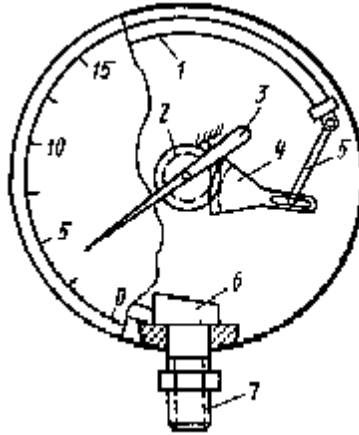


Рисунок 10.3 - Пружинний манометр

Один кінець трубчастої пружини 1 закріплений на трубі 6, що закінчується штуцером 7 для з'єднання з об'єктом виміру тиску. Запаяний кінець пружини з'єднується повідцем 5 із передавальним механізмом, що складається із сектора 4 і зубчастого колеса 2, на осі якого закріплена стрілка 3. Під впливом надлишкового тиску трубчаста пружина деформується і через передавальний механізм повертає стрілку манометра.

При використанні манометра з трубчастою пружиною, варто мати на увазі, що в умовах перемінної температури змінюється модуль пружності чуттєвого елемента, що викликає необхідність корекції показань приладу. Крім того, стабільність показань трубчастого манометра порушується явищами гістерезису при деформації пружного елемента, тому трубчасті манометри варто тарувати не рідше одного разу в рік.

10.5 Вимір тисків у потоках

Для потоків рідин і газів визначальне значення має не тільки статичний тиск, але також повний і динамічні тиски, що обумовлюються швидкісним

напором потоку. Вимірюваним параметром є і напрямок руху потоку в даному досліджуваному перерізі трубопроводу, якщо цей напрямок заздалегідь не був відомий.

Статичним (P) прийнято називати тиск, що виникає на поверхні досить малого тіла, що рухається з потоком, або тиск потоку на стінку, уздовж якої він рухається. Тому статичний тиск можна вимірювати через отвір 1 у стінці за схемою, показаної на рисунку 10.4.

Повним називають тиск p_n , із яким діє потік на нерухоме тіло, що розташоване в потоці, у тій його точці, де швидкість потоку, що набігає на тіло, загальмовується до нуля. Якщо прийняти до уваги те, що гальмування струмків газу, що не обмежені твердими стінками, відбувається практично за адіабатою і без втрат повного тиску, величина цього тиску може бути вимірювана відкритою трубкою 2, яку установлюють проти потоку (рис. 10.4).

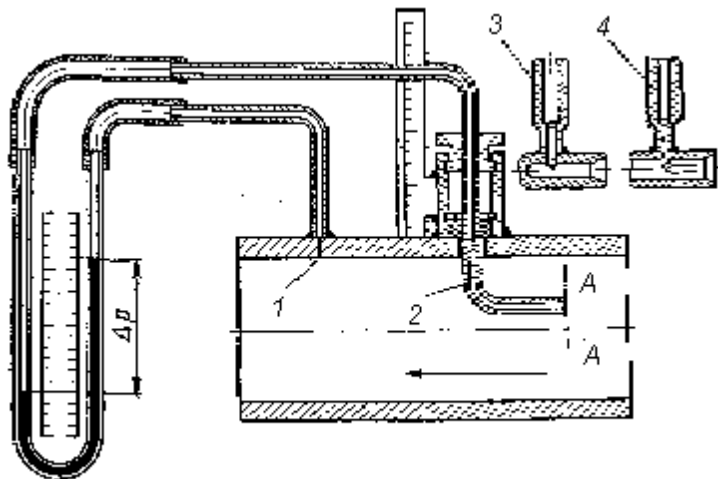


Рисунок 10.4 - Вимір повного й статичного тисків

Відповідно до рівняння Бернуллі, повний тиск у перетині А-А, що віднесений до 1 кг маси

$$p_n = \rho \cdot (\omega^2/2) + p, \quad (10.9)$$

де ω - швидкість незбуреного потоку в місці виміру, м/с;

ρ - густина газу, кг/м³;

p - статичний тиск у потоці, Па.

Очевидно, динамічний тиск потоку, чи швидкісний напір його, визначається різницею

$$p_n - p = \rho \cdot (\omega^2 / 2) = \Delta p, \quad (10.10)$$

яку легко вимірити, якщо приймачі тисків p_n і p підключити до U-подібного манометра за схемою, зображеної на рисунку 10.4. У випадках, коли важко орієнтувати приймач за напрямком потоку, застосовують приймачі 3, де вхідний отвір, виконаний з фаскою під кутом 60...90 град, чи приймачі з протокою 4.

Ці приймачі забезпечують фіксування повного тиску з точністю 1 % при скосах потоку, що досягають 30..50 град.

На практиці частіше застосовуються комбіновані пневмометричні трубки типу Піто-Прандтля. Трубки цього типу нормалізовані, тому їх можна використовувати без тарування, якщо вони виконані зі співвідношеннями розмірів, показаних на рисунку 10.5.

Поряд із напірними трубками для виміру швидкостей використовують термоанемометри і лазерні анемометри. Термоанемометри, засновані на використанні закономірності теплообміну між спіраллю, що підігрівається струмом, і потоком повітря, що охолоджує цю спіраль. Чим більше спіраль віддає тепла, тим нижче її температура, менше опір і, отже, більша величина швидкості (ω) обдування потоком.

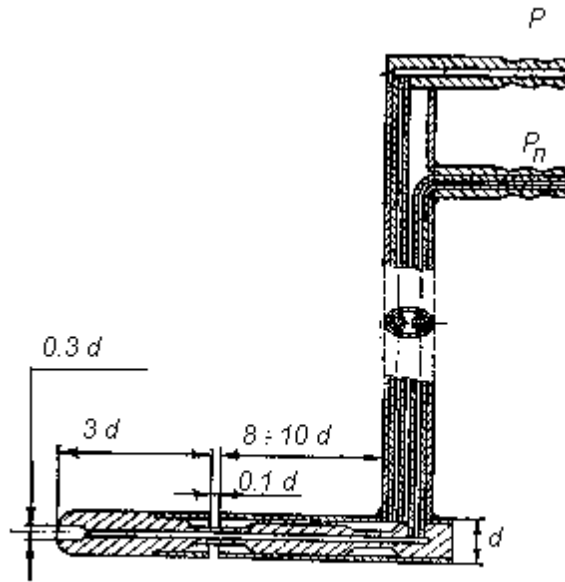


Рисунок 10.5- Пневмометрична комбінована трубка

Залежність між теплотою (Q_t), що втрачається в одиницю часу спіраллю, яка знаходиться при температурі (t_{np}) вище температури повітря (t_b), і швидкістю (ω) обдування її визначають із співвідношення

$$Q_t = \lambda \cdot l \cdot (t_{np} - t_b) \cdot (1 + k \cdot \sqrt{\omega / \lambda}), \quad (10.11)$$

де $k = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p \cdot d}$ - коефіцієнт;

λ і ρ - теплопровідність і густина повітря, Вт/(м·К) і кг/м³;

c_p - теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг·К);

d і l - діаметр і довжина спіралі, м.

Термоанемометри застосовують в основному для вимірювання швидкості потоків. Одночасно це дозволяє визначати і витрату повітря. У практиці вимірювання спіраль, що нагрівається, включають безпосередньо у вимірювальний міст у якості одного з його пліч, як показано на рисунку 10.6, і вимірюють при цьому силу струму при постійних опорі і температурі спіралі.

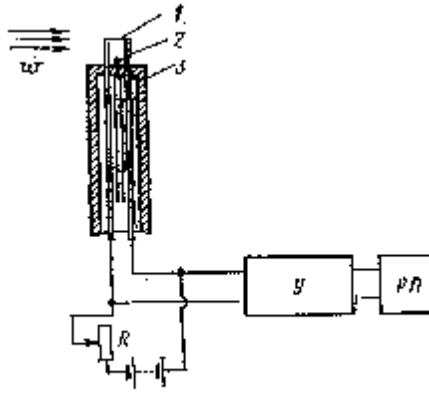


Рисунок 6.25 - Блок-схема термоанемометра

Чуттєвий елемент термоанемометрів виконують із платинового, вольфрамового і рідше нікелевого дротів діаметром 0.005...0.3 мм і довжиною 3...20 мм. Чутливість приладу підвищується зі збільшенням температури нагрівання спіралі, зменшується при цьому і вплив можливих коливань температури її нагрівання, але через побоювання порушити структуру чуттєвого елемента нагрівання обмежують 400...500 °С. На рисунку 10.6 спіраль 1 з вольфрамового дротика закріплена на спеціальній державці 3, а за нею розташована мало інерційна термопара 2, що вимірює температуру потоку. Сила струму, що протікає через вимірювальну нитку термоанемометра, майже не залежить від опору останньої завдяки введенню в схему додаткового резистора (R).

Різниця напружень на кінцях нитки, що залежить від швидкості потоку, підсилюється ланкою (П) і подається до покажчика виміру.

10.6 Електричні засоби вимірювання тиску

Принцип дії приладів цієї групи полягає в прямому або непрямому перетворенні тиску в електричну величину (напругу або струм), функціонально пов'язану з тиском. Ці прилади застосовуються головним чином в лабораторній практиці для дослідницьких цілей.

Манометри виконують функцію локального контролю й у більшості випадків через відсутність можливості дистанційного доступу до їхніх показів (за винятком манометрів з уніфікованим вихідним електричним сигналом) не можуть використовуватися для цілей сучасної автоматизації. Таку можливість забезпечують вимірювальні перетворювачі тиску (ВПТ).

ВПТ за способом відображення та обробки вимірюваного тиску поділяються на первинні (формують для дистанційної передачі вихідний сигнал, що відповідає вимірюваному тиску) і вторинні (отримують сигнал від первинних перетворювачів, обробляють його, накопичують, відображають і передають інші пристрої).

Сучасна тенденція розвитку ВПТ полягає в їх «інтелектуалізації» на базі мікроелектронних технологій і мікропроцесорної техніки, що припускає передачу частини функцій системи керування вторинним перетворювачам, а деяких традиційних функцій вторинних перетворювачів — первинним.

Відомі десятки способів перетворення тиску в електричний сигнал, але тільки деякі з них набули широкого застосування у ВПТ. За принципом дії, або способом перетворення вимірюваного тиску у вихідний сигнал, первинні ВПТ поділяються насамперед на деформаційні електричні. У перших деформаційні переміщення пружного чутливого елемента (ЧЕ) (мембрани, сильфона, трубки Бурдона) передаються за допомогою додаткових проміжних механізмів і перетворювачів в електричний або електромагнітний сигнал (такі ВПТ розглядалися в попередніх розділах), а в інших вимірюваний тиск, діючи на ЧЕ, змінює його власні електричні параметри: опір, ємність або заряд, що стають мірою цього тиску. Переважна більшість сучасних ВПТ реалізовані на основі ємнісних(використовують ЧЕ у виді конденсатора з перемінним зазором: зсув або прогин під дією прикладеного тиску рухливого електрода-мембрани щодо нерухомого змінює ємність ЧЕ), п'єзоелектричних(засновані на залежності поляризованого заряду або резонансної частоти п'єзокристалів: кварцу, турмаліну й інших — від тиску) або тензорезисторних(використовують залежність активного опору провідника або напівпровідника від ступеня його

деформації) принципах. В останні роки одержали розвиток й інші принципи створення ВПТ: частотні, іонізаційні, теплові, в'язкісні.

Більшість діючих ВПТ відноситься до аналогових з уніфікованим струмовим сигналом 0...5, 0...20 або 4...20 мА. В останнє десятиліття намітився перехід до ВПТ із цифровим виходом. Широке поширення одержав цифровий протокол HART. Цей відкритий стандартний гібридний протокол двонаправленого зв'язку передбачає передачу цифрової інформації поверх стандартного аналогового сигналу 4-20 мА. Бурхливо розвивається системна інтеграція первинних перетворювачів з використанням різних різновидів промислових мереж Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus і ін.). При цьому використовується цифровий комунікаційний протокол для передачі інформації в обох напрямках між ВПТ і системами керування, істотно полегшуючи взаємозамінність ЗВТ різних світових виробників. У цифрових ВПТ поки переважають такі цифрові інтерфейси, як ДДПК (двійково-десятковий паралельний код), ІРПС (інтерфейс радіальний послідовний) і RS-232C [46].

ВПТ поділяються за видами вимірюваного тиску, використовуваними одиницями вимірювання і ряду основних технічних параметрів: діапазону вимірюваного тиску (вибирається для кожної моделі зі стандартного ряду тисків), границям основної похибки, що допускається, (визначається при стандартній температурі +20 °С від верхньої межі діапазону вимірювання і містить у собі, як правило, похибки від гістерезису ЧЕ, його лінійності і відтворюваності результатів вимірювання), границям додаткової температурної похибки (ця межа задається від зміни температури щодо нормальної на кожні 10 або 28 °С або на весь температурний діапазон роботи), припустимому робочому діапазону температур навколишнього середовища (іноді додатково вказують припустимий діапазон температур технологічного процесу або вимірюваного середовища і корпусу ЗВТ), динамічному діапазону вимірювання тисків (відношенню максимального значення вимірюваного тиску до мінімального), стабільності метрологічних характеристик у часі (як відсоток від верхньої межі діапазону вимірювання протягом 6 або 12 місяців), стійкості

до вібрацій, захистові від високочастотних перешкод, кліматичним і вибухобезпечним виконанням, вимогам до джерела живлення і по інших параметрах.

ЗАСОБУ ВИМІРУ ВИТРАТ РІДИН І ГАЗІВ

Прилади, призначені для визначення об'єму або маси речовини, що проходить перетин трубопроводу в одиницю часу, називаються витратомірами.

Об'ємна Q_0 і масова M витрати рідини можуть бути виражені в одиницях $\text{м}^3/\text{с}$; $\text{м}^3/\text{год}$; $\text{л}/\text{год}$; і $\text{кг}/\text{с}$; $\text{кг}/\text{год}$; $\text{т}/\text{год}$ відповідно. Для одержання порівнянних результатів об'ємна витрата повинна бути приведена до нормальних умов Q_n ($t_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $p_n = 101325\text{ Па}$; відносна вологість $\varphi = 0$).

Серед вимірників витрати робочого тіла використовують різні напірні трубки, звужувальні пристрої, витратоміри постійного перепаду тисків (ротаметри), а також різного типу лічильники й електромагнітні витратоміри.

11.1 Звужувальні пристрої

Принцип дії приладів цього типу заснований на залежності перепаду тиску у звужувальному пристрої від швидкості потоку, а отже, і від витрати рідини. У якості стандартних звужувальних пристроїв (рис. 11.1) застосовують діафрагми (а), сопла (б) і сопла Вентурі (в).

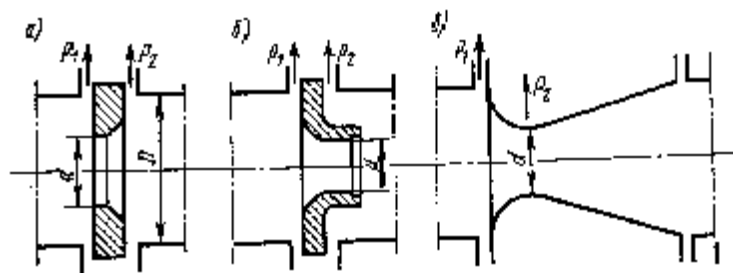


Рисунок 11.1 - Стандартні звужувальні пристрої

Практичне використання методу виміру витрати за перепадом тиску у звужувальному пристрої пов'язане з необхідністю дотримання визначених вимог: течія рідини повинна бути турбулентною й стаціонарною; вимірювальні приймачі повинні бути віддалені від джерел місцевих гідравлічних опорів; потік повинний заповнювати весь перетин трубопроводу, а фазовий стан рідини

не повинний змінюватися при її проходженні через звужувальний пристрій; потік рідини чи газу не повинний утворювати яких-небудь відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів. На рис. 11.2, а показана структура потоку, що проходить через діафрагму, на рис. 11.2,б - розподіл тиску на стінки трубопроводу. При течії рідини через діафрагму лінії токи підгортаються до центра, а в кутах утворюються вихрові області зворотної течії. На утворення вихрів у цих областях витрачається значна частина кінетичної енергії потоку, що приводить у кінцевому рахунку до падіння тиску в трубопроводі (Δp_n).

Для визначення залежності витрати від перепаду тиску припустимо, що рідина нестислива. У цьому випадку, із рівняння Бернуллі випливає

$$p_1' - p_2' = \rho \cdot (\omega_2'^2 - \omega_1'^2) / 2, \quad (11.1)$$

де p_1' і p_2' - абсолютні тиски в перетинах (А) і (У), Па;
 ω_1' і ω_2' - швидкості потоку в тих же перетинах, м/с.

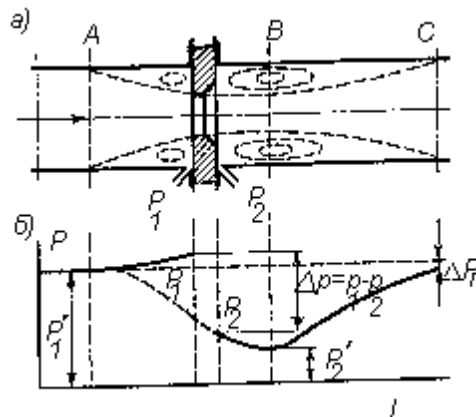


Рисунок 11.2 - Структура потоку й розподіл тиску при застосуванні нормальної діафрагми

Зв'язок між швидкостями ω_1' і ω_2' знаходиться з рівняння нерозривності

$$F_1 \cdot \omega_1' = F_2 \cdot \omega_2', \quad (11.2)$$

де F_2 - площа найменшого перетину струменя, яку можна виразити через площу отвору діафрагми, m^2

$$F_2 = \mu \cdot F_0, \quad (11.3)$$

де $\mu = F_2 / F_1$ - коефіцієнт звуження струменя.

Середня швидкість ω_2' знаходиться з рівняння (11.1) з урахуванням (11.2) і (11.3)

$$\omega_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2}} \sqrt{2(p_1^{\circ} - p_2^{\circ}) / \rho}, \quad (11.4)$$

де $m = F_0 / F_1 = (d / D)^2$ - відносна площа звужуючого пристрою.

У дійсності перепад тиску вимірюють не в перетинах (А) і (В), а в кутах діафрагми, тому у формулу (11.4) вводять поправочний коефіцієнт (ξ). Таким чином, середня швидкість у найбільш вузькому перетині потоку визначається за формулою

$$\omega_2' = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{2(p_1 - p_2) / \rho}, \quad (11.5)$$

а масова витрата (кг/с) рідини знаходимо з рівняння

$$M = \rho \cdot \omega_2' \cdot F_2 = \frac{\mu \cdot \xi \cdot F_0}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho (p_1 - p_2)}. \quad (11.6)$$

Уводячи в рівняння (11.6) коефіцієнт витрати

$$\alpha = \mu \cdot \xi \cdot \sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2}$$

остаточно одержимо

$$M = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}. \quad (11.7)$$

Для об'ємної витрати ($\text{м}^3/\text{с}$) рівняння 11.6) прийме вигляд

$$Q = \alpha \cdot F_0 \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho} . \quad (11.8)$$

У випадку виміру витрати стисливої рідини ($M > 0.2$) розрахунок ведеться за аналогічними залежностями:

$$M = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} ; \quad (11.9)$$

$$Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho} , \quad (11.10)$$

де ε - поправочний множник на розширення вимірюваного середовища.

Дуже часто звужувальні пристрої стандартизують, що дозволяє використовувати коефіцієнт витрати без проведення індивідуального тарування.

При виборі звужувального пристрою варто мати на увазі, що установка останнього приводить до втрати тиску в трубопроводі. Найменші втрати тиску у соплах Вентурі завдяки більш повному відновленню тиску в дифузори сопла.

11.2 Похибка вимірювання

При вимірі витрати за перепадом тиску у звужувальних пристроях необхідно враховувати похибки виміру окремих величин, що входять у рівняння витрати (11.9) і (11.10).

Усі величини, що входять у рівняння (11.9) і (11.10) можна розділити на дві групи. До першої групи відноситься (α) і (ε), що отримані в результаті обробки великої кількості вимірювання і для якої відомі середньоквадратичні й граничні припустимі похибки.

До другої групи відносяться величини (Δp), (ρ) і (d), що можуть бути оцінені граничною припустимою погрешністю (δ_i), що залежить від класу точності вимірювальних приладів.

Однак пряме підсумовування середньоквадратичних і граничних похибок неприпустимо. Тому, звичайно, допускається, що для другої групи величин середньоквадратична похибка виміру дорівнює половині граничній припустимій (тобто передбачається, що похибки підкоряються нормальному законові розподілу з довірчою ймовірністю, яка дорівнює 0,95). Таким чином, середньоквадратичну похибка виміру масової витрати звужуючим пристроєм можна обчислити за формулою

$$\sigma_m = \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\partial M}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \sigma_\varepsilon \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\partial M}{\partial d} \sigma_d \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial p} \sigma_p \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta p} \sigma_{\Delta p} \right)^2 \end{aligned} \right]^{1/2}, \quad (11.11)$$

Після визначення похідної відповідно до рівняння (11.9) і, підставляючи її значення в (11.11), одержимо

$$\sigma_m = \left[\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + (2 \cdot \sigma_d)^2 + (\sigma_p / 2)^2 + (\sigma_{\sqrt{\Delta p}})^2 \right]^{1/2}. \quad (11.12)$$

де $\sigma_d = \delta_d / 2$; $\sigma_p = \delta_p / 2$; $\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \delta_{\Delta p} / 2$.

Гранична відносна похибка визначається як подвоєна середньоквадратична похибка

$$\delta_m = 2 \cdot \sigma_m. \quad (11.13)$$

Тут слід зазначити, що не можна визначити величину δ_m через клас точності приладу за формулою $\delta_m = K \cdot M_{\text{ВП}} / M$, тому що клас точності приладу визначає граничну похибка виміру вихідної величини, що є тільки частиною похибки $\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$.

11.3 Вимір витрати при малих числах Рейнольдса

При випробуваннях ДВЗ часто виникає необхідність виміру витрат при значеннях числа Рейнольдса $Re < Re_{min}$, що мають місце при течії рідини й газу по трубопроводах малих діаметрів ($D_{20} < 50$ мм). У цьому випадку використовують звужувальні пристрої спеціальної конструкції, що розраховані на постійне значення коефіцієнта витрати при малих числах Рейнольдса. На рисунку 6.28 схематично показані деякі з таких пристроїв.

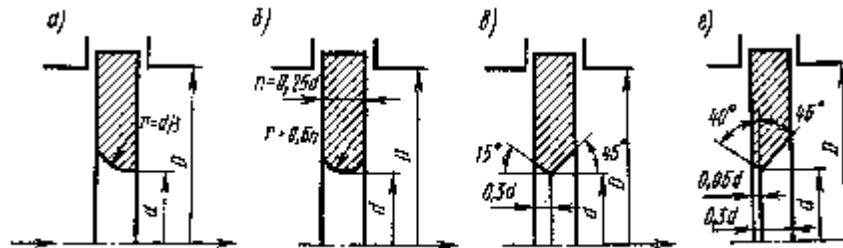


Рисунок 11.2 - Звужувальні пристрої для виміру витрат при малих числах Рейнольдса

Ці звужувальні пристрої необхідно індивідуально тарувати разом із прилягаючими ділянками трубопроводів у конкретних межах зміни чисел Рейнольдса.

11.4 Ротаметри

Ротаметри вимірюють витрати також за перепадом тиску і широко застосовуються для вимірювання невеликих об'ємних витрат рідини ($0.04...16$ м³/ч) і газу ($0.064...40$ м³/ч) у вертикальних трубопроводах діаметром від 4 до 100 мм. Ротаметр являє собою конічну скляну трубку, усередині якої міститься поплавець. Поплавець, постачений бортиком із косими канавками, що забезпечують його стійкість (рис. 11.3). Під дією потоку рідини чи газу поплавець займає визначене положення в центрі трубки. При цьому досягається рівновага сил, що діють на поплавець, сила ваги (G) врівноважується піднімальною силою (P), інерційної (I) (динамічним напором) і силою тертя (F), тобто

$$G = P + I + F. (11.14)$$

Піднімальна сила виникає за рахунок різниці статичних тисків ($p_a - p_b$) у перетинах (а) і (б)

$$p = (p_a - p_b) \cdot f, (11.15)$$

де f - найбільша площа поперечного переріза поплавця, m^2 .

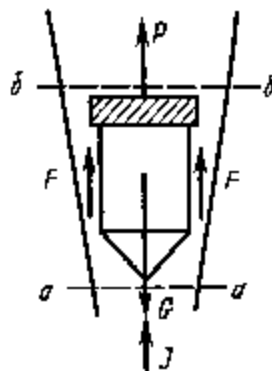


Рисунок 11.3 - Конструкція ротаметра

З рівнянь (11.14) і (11.15) одержимо

$$p_a - p_b = (G - I - F)/f. (11.16)$$

Якщо в першому наближенні зневажити інерційною силою (I) і силою тертя (F), то маємо

$$p_a - p_b = G / f = V_n \cdot \rho \cdot g / f, (11.17)$$

де V_n - об'єм поплавця, m^3 ;

ρ - густина матеріалу поплавця, kg/m^3 ;

g - прискорення вільного падіння, m/s^2 .

З рівняння (11.17) випливає, що перепад тиску не залежить від витрати, тому ротаметри відносяться до групи витратомірів постійного перепаду тиску. Очевидно, що витрата однозначно зв'язана з площею кільцевого перетину, а отже, і з вертикальним положенням поплавця. Цю залежність можна записати у виді

$$Q_0 = \alpha \cdot f_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot V \cdot (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 \cdot f)} , (11.18)$$

де α - коефіцієнт витрати ротаметра;

ρ - густина рідини, кг/м³;

f - площа кільцевого зазору, м².

Однак точної лінійної залежності між переміщенням поплавця (h) і витратою (Q_0) не спостерігається, тому що, по-перше, при конічній формі трубки (f) нелінійно залежить від (h) і, по-друге, є деяка зміна коефіцієнта витрати (α). Для тарування ротаметрів як для рідини й газу використовують воду й повітря. При вимірі витрат інших рідин і газів показання ротаметрів перераховують на вимірюване середовище з урахуванням густини і в'язкості.

ТЕМА 12

АНАЛІЗ ГАЗІВ

12.1 Призначення й методи аналізу газів

Газовий аналіз дозволяє визначити фактичне використання повітря й палива у двигуні з урахуванням розподілу по окремих циліндрах, можливі втрати внаслідок протікання через впускний отвір циліндра й у порожнину картера і т. п. До аналізу газів прибігають також при дослідженні складу робочого тіла в циліндрах двигуна на окремих стадіях протікання його робочого циклу й в інших випадках.

За принципом дії існуючі газоаналізатори розділяють на: механічні, теплові, магнітні, електричні, Оптичні, хроматографічні й мас-спектрометричні.

Робота **механічних** газоаналізаторів базується на вимірюванні молекулярно-механічних параметрів стану або властивості аналізованої газової суміші. Вимірюваними величинами в приладах цього типу є: зміна об'єму чи тиску проби газової суміші після хімічного впливу на даний компонент; в'язкість газової суміші, густина її, а також деякі інші властивості (наприклад, швидкість поширення звуку, швидкість дифузії). Відповідно до цього розрізняють: об'ємні, манометричні, густиномірні, акустичні й ультраакустичні, дифузійні й ін. газоаналізатори.

Теплові газоаналізатори базуються на визначенні теплових властивостей шуканого компонента газової суміші. Вимірюваними величинами в них є теплопровідність газової суміші і корисний тепловий ефект реакції каталітичного окислювання обумовленого компонента. Тому такі газоаналізатори розділяють на теплопровідні й термохімічні.

Принцип дії **магнітних** газоаналізаторів заснований на вимірюванні магнітних параметрів, що характеризуються об'ємною й питомою магнітною сприйнятливістю. Перша з них оцінює інтенсивність намагнічування газу при даній напруженості магнітного поля і залежить від густини, а отже,

температури й тиски газу. Питома магнітна сприйнятливість не залежить від агрегатного стану речовини, температури й тиску. Найбільша магнітна сприйнятливість притаманна кисню. Ця властивість його настільки велика, що визначає магнітну сприйнятливість усієї газової суміші незалежно від змісту інших компонентів, і дозволяє вести вибіркові виміри концентрації кисню в складних газових сумішах.

Робота **електричних** газоаналізаторів заснована на принципі вимірювання однієї з електричних характеристик безпосередньо самого газу чи рідини, із яким прореагував газ. До таких аналізаторів відносять різні іонізаційні й електрохімічні прилади.

Оптичні газоаналізатори складають велику групу приладів, що за зміною, наприклад, показника переломлення чи інших оптичних властивостей аналізованої газової суміші, дозволяють судити про концентрацію в ній шуканого компонента. Найбільш поширені оптико-акустичні аналізатори,, засновані на поглинанні інфрачервоного випромінювання. У цій області спектра кожен газ поглинає випромінювання у властивих йому ділянках, зумовлених частотами власних коливань атомів чи іонів і окремих структурних груп у молекулі, а також обертанням останніх з різною кутовою швидкістю. Унаслідок цього інфрачервону радіацію поглинають тільки гази, молекули яких містять не менш двох різних атомів чи іонів.

Механізм дії оптико-акустичних аналізаторів заснований на використанні явища розігріву газу при поглинанні радіації й охолодженні його, коли дія променів припиняється. Якщо помістити газ у закриту судину і при опроміненні його інфрачервоною радіацією, підвищується температура й тиск газу. При періодичному опроміненні газу зростання тиску фіксується чутливим елементом - мікрофоном. Коливання мембрани і відповідні цьому зміни ємності конденсатора, перетворюються на виході з підсилювача в постійний струм, що служить мірою концентрації шуканого компонента досліджуваної суміші. Оптико-акустичні аналізатори дозволяють із точністю 2.5 % визначати зміст у газовій суміші окису вуглецю, вуглекислого газу, метану й суми вуглеводнів

при безупинному взятті проб. Але не розраховані на визначення змісту окислів азоту й альдегідів в аналізованих газах. Хімілюмінесцентний аналізатор заснований на хімічній люмінесценції окису азоту NO з озоном O₃



Так як інтенсивність протікання цієї реакції пропорційна витраті окису азоту NO, то представляється можливість на порівняно високому рівні автоматизувати визначення кількісного її змісту при безупинному введенні аналізованого газу в робочу камеру приладу.

Хроматографічні газоаналізатори являють собою пристрої, що дозволяють розділяти складні газові суміші на окремі складові внаслідок адсорбційних процесів, які визначаються різною швидкістю руху окремих компонентів суміші уздовж шару сорбенту. У газорідній хроматографії використовують різну розчинність газових компонентів у рідинах, які наносять на поверхню тефлону, цегли й інших твердих інертних носіїв. Рідкими сорбентами є високомолекулярні ефіри, спирти і силіконові олії. Принципова схема аналізатора такого типу приведена на рисунку 12.1.

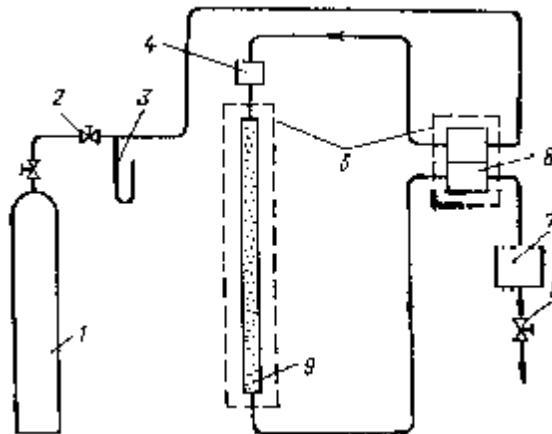


Рисунок 12.1 - Блок-схема хроматографічного газоаналізатора

Газ-носіє з балона 1 проходить через порівняльну камеру диференціального детектора 6, дозатором 4 до нього вводиться проба і разом з аналізованим газом надходить у розділову хроматографічну колонку 9, після

якої проходить через робочу камеру детектора 6 і контрольний пристрій 7. Аналізована газова суміш розділяється на окремі компоненти, точно витримуючи умови поділу. Хроматограма виглядає як основна лінія фону чистого газоносія, що переривається піками ряду кривих. Площі, що обмежені цими сплесками, характеризують кількісний зміст окремих компонентів аналізованої газової суміші. Метод дозволяє визначати концентрації речовин, що мають порядок мільйонних часток із точністю 3 % і відтворюваністю до 0.5 %.

Мас-спектрометричні газоаналізатори відрізняються тим, що в них використовують основну характеристику речовини, масу молекули чи атома. Мас-спектрометри дозволяють вивчати скороминучі процеси, кінематику хімічних реакцій, а також будову молекул. Сутність мас-спектрометричного аналізу складається: у перетворенні молекул даної речовини в іони й формуванні іонного пучка в електричному полі джерела іонів; поділ іонного пучка за масами у магнітному чи електромагнітному полі чи в просторі без цих полів і, нарешті, в уловлюванні іонів і реєстрації іонних струмів кожної складової іонного пучка в приймачі іонів.

Слід зазначити, що точність газового аналізу багато в чому визначається ще на стадії добору проб і залежить тому від якості цього процесу.

11.2 Способи вираження концентрації компонентів газової суміші

Концентрацію окремих компонентів у газовій суміші виражають в одиницях маси, що міститься в одиниці об'єму у відсотках за об'ємом, тобто в об'ємних відсотках (% об.), що більш зручно.

Концентрацію за масою вимірюють у г/л, мл/л, г/м³, мг/м³, а також числом грамів речовини в 100 г суміші (% масові).

Дуже малі кількості вимірюють у гамах γ ; $1\gamma = 10^{-3}$ мг і, отже, $1\text{мг/м}^3 = 1\gamma/\text{л}$.

Концентрацію канцерогенних речовин виражають у $\gamma/\text{м}^3$ чи $\gamma/100\text{ м}^3$.

Концентрацію в об'ємних одиницях вимірюють числом мілілітрів речовини в 100 мл суміші, тобто у відсотках за об'ємом, чи ж у мл/л (10^{-4} %) і мл/м^3 (10^{-4} %).

Малі концентрації виражають іноді числом часток, що приходяться на мільйон часток усієї суміші (чнм) чи ppm

$$1 \text{ ppm} = 1/10^6 = 10^{-4} \% \text{ об.}$$

Дуже малі концентрації виражають також числом часток на мільярд часток суміші і позначають ppb (parts per billion)

$$1 \text{ ppb} = 1/10^9 = 10^{-7} \% \text{ об.}$$

Оцінка токсичності газів в одиницях ppm (чнм) зручна тим, що вона завжди виражається цілими числами.

При необхідності перерахування концентрації з масових одиниць $g_{\text{т.к.}}$ (мг/л) в об'ємні $Ст_{\text{т.к.}}$ (% об.) і зворотно можна користатися залежностями:

$$Ст_{\text{т.к.}} = [V_{\text{м}} \cdot g_{\text{т.к.}} / (\mu_{\text{тк}} \cdot 1000)] \cdot 100, (12.2)$$

$$g_{\text{т.к.}} = 10 \cdot Ст_{\text{т.к.}} \cdot \mu_{\text{тк}} / V_{\text{м}},$$

де $V_{\text{м}}$ - об'єм однієї грам-молекули (при 760 мм рт. ст. і 0°C - $V_{\text{м}}=22.41$ л);
 $\mu_{\text{т.к.}}$ - молекулярна маса токсичного компонента, г.

12.3 Застосування аналізу газів для оцінки використання повітря й палива у двигунах

Дійсне використання повітря й палива в циліндрах ДВЗ, звичайно, оцінюють експериментально, найчастіше з використанням методу аналізу газів. За даними аналізу визначають фактичну величину коефіцієнта надлишку

повітря, що дозволяє судити, наприклад, про розподіл повітря й палива по циліндрах у багатоциліндрових двигунах.

Для випадку повного згоряння використовуємо просту і порівняно точну розрахункову формулу, названу іноді азотною

$$\alpha = N_2 / [N_2 - (79/21) \cdot O_2] = 1/[1 - 3.76 \cdot (O_2 / N_2)], \quad (12.3)$$

де N_2 і O_2 - об'ємні відсотки азоту й кисню в сухих продуктах згоряння, що пропорційні об'ємним часткам $[N_2]$ і $[O_2]$.

Для випадку неповного згоряння формула азотного варіанта

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3.76 \cdot [O_2 - 0.5 \cdot (CO + H_2 + 4 \cdot CH_4) / N_2]}, \quad (12.4)$$

де C , H_2 , CH_4 варто підставляти в об'ємних відсотках.

Для практичних розрахунків коефіцієнта надлишку повітря можна застосовувати формулу

$$\alpha = \frac{0.145 \cdot (1 - [CO])}{[CO] + [CO_2] + 0.00187 \cdot C_{C_nH_n}} + 0.023, \quad (12.5)$$

де $[CO]$ і $[CO_2]$ - об'ємні частки оксиду і діоксида вуглецю в сухих продуктах згоряння;

$C_{C_nH_n}$ - масовий зміст вуглецю у вуглеводнях на одиницю об'єму сухих продуктів згоряння, мг/л.

12.4 Вимір димовикиду відпрацьованих газів

Питанням нормування димовикиду і методам його оцінки в даний час приділяють виняткову увагу. Як правило, нормують димовикід дизелів.

Прилади - димоміри за принципом їхньої дії розділяють на дві групи, засновані на фільтрації газу чи на просвічуванні його.

Димоміри типу **"Бош"** дозволяють оцінювати задимленість газів за ступенем відображення світла поверхнею фільтрувального папера, що покривається шаром сажі внаслідок просмокування через неї заданого об'єму відпрацьованих газів. Точність такого типу приладів багато в чому залежить від товщини й властивостей фільтрувального паперу, пропорційності зміни оптичної густини фільтра в діапазоні вимірювання і параметрів потоку, що визначають кількісний зміст газів в об'ємі проби.

Димоміри типу **"Хартридж"** оцінюють відносну задимленість за оптичною густиною самого газу при просвічуванні його шару заданої товщини (звичайно, 0.5 м). Звичайно, прилади такого типу тарують за допомогою фільтрів із відомими характеристиками світло поглинання.

Випробування дизелів на димовикід відпрацьованих газів проводять за зовнішньою швидкісною характеристикою. Гранично припустимі норми димовикиду дизелів при повному навантаженні складають 40...45 одиниць (3..3.5 од. Бош).

13.1 Загальні положення

З погляду природи виникнення між звуками, шумом і вібрацією ніякої різниці немає. Усі вони в основі своєї складаються з гармонійних коливань. Різниця складається лише в їхньому психофізіологічному сприйнятті. Вібрація сприймається дотиком, шум - слухом. Визначальними характеристиками джерела коливань є частота (f) і інтенсивність коливань. Коли оцінюють шум, то під інтенсивністю мають на увазі звуковий тиск (p), а в застосуванні до оцінки вібрації - амплітуди переміщення, швидкості чи прискорення коливального процесу. Крім того, звукова хвиля характеризується довжиною (λ) і періодом (T)

$$f = a / \lambda = 1 / T, (13.1)$$

де, a - швидкість поширення звукового коливання в досліджуваному середовищу, м/с.

При дослідженні питань випромінювання, відображення й поширення звуку важливу роль грають акустичний опір середовища ($\rho \cdot a$) і сила звуку (I). Під силою звуку розуміють кількість звукової енергії, що переноситься хвилею в одиницю часу через одиничну площу, що перпендикулярна напрямку поширення хвилі. У випадку плоскої синусоїдальної хвилі

$$I = p^2 / (\rho \cdot a). (13.2)$$

Для практичних цілей прийняте поняття рівня сили звуку, яке виражається в логарифмічних одиницях - децибел (дБ). А так як сила звуку

пропорційна звуковому тиску, то рівень сили звуку визначають також через величину звукового тиску

$$\beta = 10 \cdot \lg(I / I_0) = 20 \cdot \lg(p/p_0), \quad (13.3)$$

де I і p - вимірювані величини;

I_0 – мінімальне граничне значення сили звуку, рівне 10^{-20} Вт/м²;

p_0 - звуковий тиск, умовно прийнятий за поріг чутливості вуха людини ($2 \cdot 10^{-5}$ МПа).

При дослідженні вібрацій, крім безпосередніх значень амплітуд переміщення, швидкостей і прискорень, вимірюють також і рівень цих амплітуд відносно умовно граничних значень чутливості, що не залежать від частоти коливань і складають $5 \cdot 10^{-8}$ м/с. Граничне значення амплітуд переміщень і прискорень на будь-якій частоті

$$A_j = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A_v = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot A_s, \quad (13.4)$$

де A_j , A_v , A_s - відповідно амплітуди віброприскорення, віброшвидкості й вібропереміщення.

Спектри шуму обумовлюються наявністю в коливальному процесі синусоїд із різними амплітудами, фазами й довжинами хвиль, унаслідок чого їх поділяють на три види: дискретні чи лінійчаті, суцільні й змішані. Спектри шуму двигунів внутрішнього згоряння, як правило, змішані.

13.2 Прилади й методи виміру шуму й вібрації двигуна

Спектри шумів досліджують за допомогою об'єктивних шумомірів, що складаються з датчика (мікрофона чи акселерометра), що сприймає звуковий тиск чи вібрацію, вимірювальної ланки, що виконана у вигляді підсилювача і

називаного, звичайно, шумоміром чи віброметром, і вихідної ланки - показчика, градуйованого в дБ.

Мікрофони застосовують із досить широким робочим частотним діапазоном, із високою й стабільною чутливістю і можливо меншими розмірами. При внесенні у звукове поле вони не повинні його спотворювати. Звичайно, використовують конденсаторні, електродинамічні, п'єзоелектричні й керамічні мікрофони. Кращими з них вважають конденсаторні й п'єзоелектричні.

Вібродатчики в залежності від призначення дозволяють вимірювати як відносні, так і абсолютні параметри коливальних процесів. Зараз виняткове поширення одержали датчики прискорення, а інші параметри вібрації визначають за допомогою спеціальних інтеграторів, що дозволяють перетворювати прискорення в потрібні вихідні параметри. Звичайно, використовують ємнісні, індуктивні, тензорезисторні і п'єзоелектричні датчики. Останні найбільш поширені, оскільки вони мають високу чутливість і широкий діапазон вимірюваних частот.

Шумоміри і віброміри є вимірювальною ланкою в розглянутих пристроях. Працюють вони на використанні транзисторних і інших підсилювачів, що мають відповідні характеристики для трьох визначених значень частот, що дозволяє вимірювати рівень голосності чистих тонів у діапазонах: 25...55 фон - характеристика (А), 55...85 фон – (В) і від 85 фон - (С). Характеристика (С) має прямолінійну ділянку і дає рівень звукового тиску в децибелах.

У сучасних шумомірах передбачають ще лінійну характеристику, що забезпечує лінійність коефіцієнта підсилення приладу в діапазоні частот від 2...10 до 20...40 кГц. Шумоміри з лінійною характеристикою використовують, і як віброміри, так як для них необхідна саме лінійна характеристика в широкому частотному діапазоні.

13.3 Вивчення зносу двигунів

Метод дослідження зносу й тривалість випробувань вибирають з урахуванням очікуваної інтенсивності зношування, наявності матеріальних засобів, апаратури, часу і т. і.

Існуючі методи визначення зносу за їхніми принциповими особливостями можна розділити на дві групи:

а) методи, що дозволяють одночасно з визначенням величини зносу виявляти розподіл його за поверхнями тертя, тобто визначати геометричну форму зношеної деталі. До таких відносяться: безпосереднє обмірювання (мікрометраж) деталей, вимір лунок на обстежуваних поверхнях і профілографування;

б) методи, що дозволяють визначати тільки кількісну втрату металу з тертьових поверхонь деталей. До таких відносяться: зважування деталей, визначення зносу за концентрацією продуктів зносу в мастилі, або радіоактивних ізотопів, що вводяться до поверхні тертя.

Методи визначення зносу підрозділяють також на: потребуючі повного розбирання двигуна для виконання вимірювання, часткового розбирання і не потребуючих розбирань.

Мікрометраж деталей з метою визначення їхнього зносу заснований на вимірі одних і тих же розмірів деталей до і після випробувань. Звичайно, ці методики стандартизовані. Крім необхідності розбирання двигуна, метод дуже трудомісткий, причому доцільний тільки у випадку проведення тривалих випробувань, коли знос досягає великих величин і похибки виміру стають прийнятними.

Метод лунок, чи штучних баз, складається у вистругуванні алмазним різцем на поверхні тертя ромбоподібних лунок. Вимірюючи за допомогою мікроскопа розміри лунок (довжина великої діагоналі яких складає близько 1.5 мм) перед випробуваннями і після їхнього закінчення, визначають величину зносу і геометричну форму зношеної деталі. Метод штучних баз відрізняється високою точністю і значно скорочує тривалість випробувань у порівнянні зі звичайним мікрометражем.

Зважування застосовують для визначення зносу дрібних деталей паралельно з їхнім мікрометражем із повним розбиранням двигуна.

Визначення зносу за **концентрацією продуктів зносу** в мастилі двигуна не вимагає його розбирання і може бути виконане способом "залізо в мастилі" чи із застосуванням спектрального аналізу.

По "залізі в мастилі" враховують нагромадження в картерному мастилі двигуна тільки часток чорних металів, що знімаються в результаті зносу зі стінок циліндрів, поршневих кілець, шийок валів і інших деталей. Спосіб, який заснований на припущенні, що частки змиті мастилом із поверхонь тертя, тонко дисперговані і знаходяться в мастилі у зваженому стані, а їхня концентрація зростає пропорційно зносу двигуна. Точність даного методу багато в чому залежить від аналізу проби на зміст заліза, тому на практиці застосовують полярографи, у яких висока чутливість визначення параметра.

Спектральний аналіз має ту властивість, що дозволяє визначати в мастилі наявність усіх металів, застосовуваних у машинобудуванні.

Радіоактивні ізотопи в застосуванні до вивчення зносу двигунів дозволяють безупинно реєструвати спостереження в ході випробувань. Для цієї мети тим чи іншим способом активують досліджувану деталь, і в процесі роботи радіоактивні частки разом із продуктами зносу попадають до мастила, де їхню концентрацію виявляють за допомогою лічильників Гейгера.

Щоб скоротити витрати часу випробування на знос, застосовують метод прискорених іспитів, коли штучно подають абразиви в зону зносу з розрахунку створення несприятливих умов роботи.

ТЕМА 14
МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ Й КОНТРОЛЮ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ
ДВИГУНІВ

Дослідження робочого процесу зв'язано з великими зусиллями внаслідок складностей і швидкоплинності окремих етапів цього процесу. Воно може здійснюватися різними способами. З них найбільш розповсюдженим є спосіб індицирування через його простоту й універсальність.

14.1 Вимоги до частотних характеристик індикатора

Сучасні індикатори реєструють зміну тиску в циліндрі двигуна в залежності від часу, кута повороту колінчастого вала чи ходу поршня. Величина, яку вимірюють, є швидкоплинною. Так, швидкість наростання тиску на початку згоряння в сучасних швидкохідних дизелів може досягати 5000...10000 МПа/с. Природно, що більш першорядного значення набуває динамічна якість індикаторів, що обумовлена частотними характеристиками їхніх вузлів. У принципі, маючи частотні й амплітудно-фазові характеристики ланок вимірювальної системи, можна розрахувати величину динамічних похибок і внести в результати вимірювання відповідні виправлення. Однак при індицируванні двигунів бажано використовувати індикатори, частотна характеристика яких забезпечує індицирування з погрешністю, що не переважає деякої припустимої величини.

Наближена оцінка вимог до частотної характеристики індикатора можлива на підставі методів загальної теорії помилок. Розглядаючи тиск як функцію часу $p = p(\tau)$, одержимо, що відносна похибка при індицируванні

$$\delta p = d \ln[p(\tau)] = \frac{dp}{p} \frac{d\tau}{\tau} \quad (14.1)$$

Звідси, зокрема, випливає, що динамічна похибка індицирування повинна бути пропорційна швидкості наростання тиску. Застосовуючи вираження (14.1) до ділянки наростання тиску при згорянні (рис. 14.1), одержимо

$$\delta p_z = \frac{\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_z d\tau}{p_z} \quad (14.2)$$

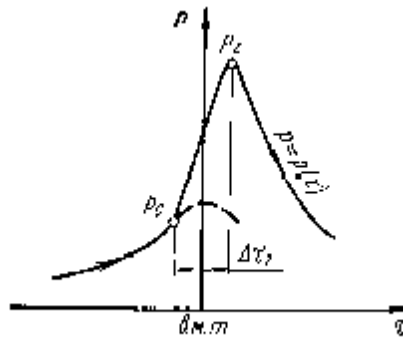


Рисунок 14.1 - До оцінки необхідних динамічних якостей індикатора

Швидкість наростання тиску

$$\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_z \approx \frac{p_z - p_c}{\Delta\tau_z} \quad (14.3)$$

Так як період вільних коливань вимірювальної системи (T) повинний бути малим, можна прийняти $T \approx d\tau_z$. Вважаючи похибка (δp_z) заданою, із вираження (14.2) знайдемо необхідне значення періоду вільних коливань вимірювальної системи

$$T \approx \frac{p_z \cdot \delta p_z \cdot \Delta\tau_z}{p_z - p_c} \quad (14.4)$$

Прийmemo для швидкохідного дизеля $\delta p_z = 1 \%$; $\Delta T_z = 0.0015$ с; абсолютний тиск $p_z = 8$ МПа, $p_c = 4$ МПа, і одержимо $T = 0.3 \cdot 10^{-4}$ с, що

відповідає частоті вільних коливань $f_0 = 1/T \approx 33$ кГц. Індикатор такою частотною характеристикою зареєструє в розглянутих умовах тиск згоряння p_z із погрешністю $p \sim 1\%$.

Цей метод оцінки частотної характеристики індикатора є універсальним, однак точність його невисока, тому що допущення $T \approx dt_z$ досить довільно. Значно більш об'єктивним є метод, заснований на використанні результатів гармонійного аналізу відповідних ділянок індикаторних діаграм. Дослідженнями встановлено, що на форму індикаторної діаграми практично майже не впливають гармоніки, починаючи з 150-го порядку. З огляду на те, що частота першої гармоніки двигуна дорівнює $n \cdot z / 60$ (z - коефіцієнт тактності), легко підрахувати необхідну найвищу частоту діапазону коливань системи індикатора:

для чотиритактних двигунів

$$f_{\max} = 150 \cdot [(n \cdot 0.5) / 60] = 1.25 \cdot n, \quad (14.5)$$

де n - частота обертання колінчатого вала, хв^{-1} .

При індицируванні серійних двигунів практично рідко удається вивести мембрану приймача тиску безпосередньо в циліндр. Тиск газу передається на мембрану через індикаторний канал, об'єм якого заповнений пружним газом, і який разом з об'ємом датчика під мембраною утворюють коливальну систему, що передає тиск із циліндра на мембрану. При цьому точність передачі тиску буде залежати від частотних характеристик індикаторного каналу, що можуть бути розраховані методами акустики. Вираження для розрахунку частоти вільних коливань стовпа довільної речовини, що заповнює індикаторний канал

$$f_0 \approx \frac{a}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{S}{\ell \cdot V_{\text{к}}}}, \quad (14.6)$$

де, a - швидкість звуку в каналі, м/с;

S - площа поперечного переріза каналу, м^2 ;

l - довжина каналу (до мембрани), м;

V_d - об'єм простору датчика під мембраною, м³.

Для вираження (14.6) похибка обчислень становить біля 10...20 %, що є задовільною. Температура стінок індикаторного каналу, що розміщений у голівці циліндра, складає приблизно 300...350 °С. Приблизно таку температуру буде мати і газ, що заповнює канал. При цьому швидкість звуку в газі $a \sim 500$ м/с.

При відомій величині швидкості звуку й розмірів каналів і об'єму під мембраною, можна за вираженням (14.6) легко підрахувати відповідні значення частот вільних коливань стовпа газу в індикаторному каналі. Результати такого розрахунку показують, що частоти вільних коливань газу навіть у дуже коротких каналах невеликі.

Тому довжина каналу повинна бути мінімальною, а діаметр як можна більшим. Крім того, об'єм під мембраною повинний бути як можна меншим. При цьому повинні виключатися коливання температури мембрани.

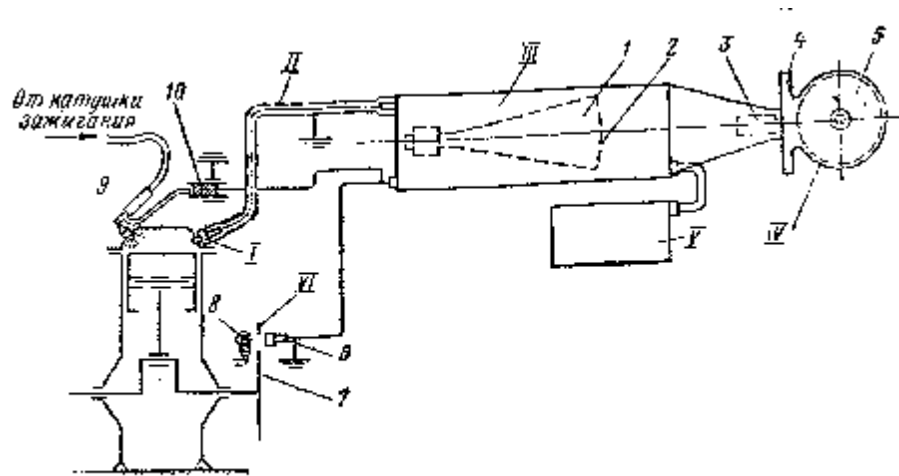
14.2 Індикатори

Електричні пристрої індицирування забезпечують запис миттєвих тисків у циліндрах за кожен робочий цикл двигуна, тобто дозволяють одержати одноциклові діаграми. Стробоскопічні послідовно фіксують тиск, який відноситься до окремих точок індикаторної діаграми за час протікання сотень циклів, забезпечуючи таким чином, одержання багаточиклових діаграм. Основними ланками індикаторів є датчики тисків і прилади, що реєструють.

14.2.1 Електричні індикатори

Індикатори цього типу засновані на застосуванні магнітоелектричних чи електронних осцилографів. На рисунку 7.2 показана схема типового індикатора,

що складається з п'єзокварцевого датчика I, коаксіального сполучного кабелю II, катодного осцилографа III з підсилувачами постійного струму, фотоприставки IV, блок живлення V і фотоелектричного датчика VI, що фіксує на діаграмі положення ВМТ. Для розгортання діаграми за часом в індикаторі служить генератор пилкоподібних сигналів, що складається з коливального контуру, утвореного конденсаторами й тиратроном із холодним катодом. Конденсатор, який включений паралельно до тиратрона, заряджається до величини потенціалу, при якому відбувається запалювання тиратрона, що викликає швидку розрядку конденсатора.



1- двопроменева катодна трубка; 2 - флуоресціюючий екран; 3 - фотооб'єктив; 4 - касета фотоприставки; 5 - обертовий барабан із фоточуттєвим матеріалом; 6 - фотоелемент; 7 - обертовий диск для визначення ВМТ; 8 - лампа; 9 - стандартний резистор проти радіоперешкод на 10 кОм; 10 - ємнісної датчик моменту запалювання

Рисунок 14.2 - Схема електричного індикатора з п'єзокварцевим датчиком

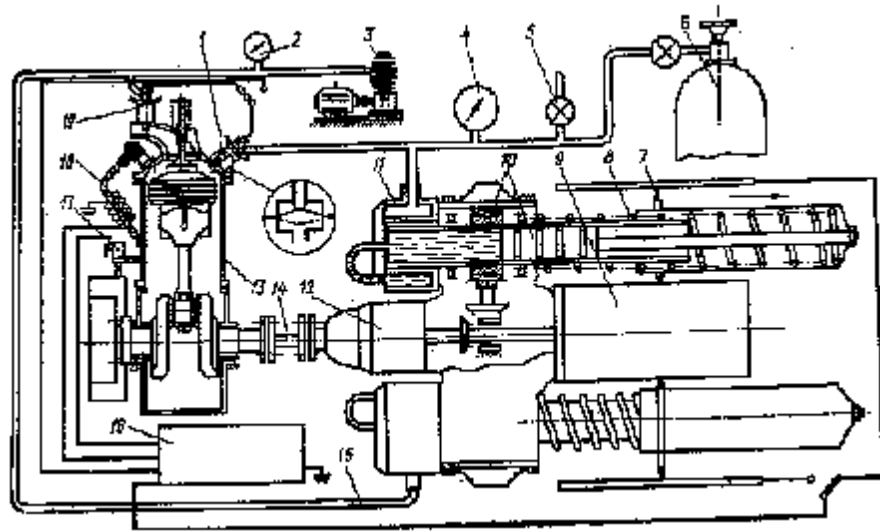
Для індицирування застосовують п'єзоелектричні, ємнісні, тензометричні й інші датчики. Найкращими динамічними якостями з них володіють ємнісні, у яких пружним елементом є мембрана, яка не зв'язана механічно з перетворювачем. Близькими до них властивостями володіють тензодатчики з

безпосереднім розміщенням перетворювача на мембрані. Власна частота п'єзодатчиків, звичайно, не перевищує 40 кГц, а тензодатчиків, у яких мембрана розділена з перетворювачем - близько 20 кГц. Значних труднощів викликає необхідність охолодження датчиків, тому що електричні властивості, наприклад, кварцевих кристалів, починають помітно змінюватися зі збільшенням температури до 150 °С. У практиці індицирування застосовують датчики, які охолоджують при роботі і з охолоджуваною мембраною.

14.2.2 Пневмоелектричні індикатори

Індикатори цього типу називають стробоскопічними, чи точечними. На рис. 14.3 представлений індикатор моделі МАИ-2А, що складається з наступних основних вузлів: датчиків тиску; підсилювача електричного імпульсу (тиратронного перетворювача); пристрою, що реєструє, і пульта керування.

При індицируванні випробуваного двигуна 13 у порожнину датчика 1 через розподільник 11 пневматичної системи подають повітря і плавно змінюють тиск у межах очікуваного тиску в циліндрі. Коли тиск у циліндрі двигуна збігається з тиском у порожнині датчика, контактний пристрій розмикає ланцюг і на виході датчика виникає електричний сигнал, що підсилюється й трансформується в тиратронному перетворювачі 16 до напруги 14...18 кВ. Посилений сигнал надходить потім на розрядника 7 пристрою, що реєструє, 12, де утворює іскру, що пробиває на електротермічному папері отвір, у вигляді чорної точки.



1, 19 - датчики тиску; 2 - маномовакууметр; 3 - вакуумний насос; 4 - манометр; 5 - кран в атмосферу; 6 - балон стиснутого повітря; 7 - іскровий розрядник записуючої частини; 8 - пружина; 9 - барабан; 10 - плунжерна пара; 11 - розподільник пневматичної системи; 12 - записуюча частина індикатора; 13 - випробуваний двигун; 14 - сполучний валик з еластичними муфтами; 15 - повітропровід; 16 - тиратронний перетворювач; 17 - індуктивний датчик ВМТ; 18 - відмітник моменту спалаху

Рисунок 14.3 - Пневматичний індикатор МАИ - 2А

Папір закріплюють на барабані 9, що приводиться в обертання через валик 14 і еластичні муфти від колінчастого вала двигуна. Так як швидкість зміни протитиску повітря в датчику набагато менше швидкості зміни тиску в циліндрі, у кожному циклі лише дві точки відповідають збігу тиску в циліндрі з протитиском повітря в датчику: одна точка на лінії підвищення тиску, інша на лінії його зниження. Відповідність величини тиску в циліндрі положенню точок на реєстраційному папері досягається тим, що розрядник пристрою, що реєструє, переміщується уздовж барабана за допомогою плунжерної пари 10 пневматичного пристрою, у яке подається повітря одночасно і під тим же тиском, що й у порожнину датчика. Цей пневматичний пристрій, навантажений пружиною 8, що має точно визначену характеристику, завдяки чому розрядник її переміщається строго пропорційно зміні тиску в порожнині датчика.

Підібравши за допомогою регулювального крана визначену швидкість зміни протитиску повітря в датчику, можна одержати на реєстраційному папері серію точок, настільки близько розташованих одна до іншої, що вони утворять майже безупинну лінію зміни тиску в циліндрі.

Датчики тиску для розглянутого індикатора виготовляють з урахуванням призначення. На рисунку 14.4,а показаний вузол чуттєвого елемента, розташованого в нижній частині датчика.

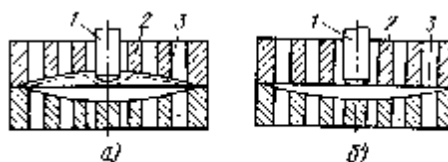


Рисунок 14.4 - Чуттєвий елемент датчика стробоскопічного індикатора

Чуттєвий елемент являє собою мембрану 3 і обмежники 2 і 4. Контактний штифт 1 ізолюваний від корпусу й мембрани. Повітря проходить до мембран осьовими отворами обмежника 2, а гази з порожнини циліндра двигуна отворами обмежника 4. Центр мембрани, затиснутої між обмежниками, може переміщатися в межах зазору, рівного 0.1...0.2 мм і утвореного внутрішніми сферичними поверхнями обмежників. У верхньому положенні мембрана, стикаючись із контактом 1, замикає його на масу. При замиканні чи розмиканні контакту виникає електричний сигнал, що надходить потім у підсилювач. Тиском повітря, що поданий з балона у внутрішню порожнину датчика, мембрана віджимається до нижнього сидла. але під дією підвищення тиску в циліндрі настає момент, коли тиск у внутрішній порожнині датчика вирівнюється, а потім стає менше тиску в циліндрі. У результаті мембрана відходить від нижнього обмежника і притискається до верхнього, замикаючи контакт 1, унаслідок чого і виникає електричний сигнал. При зниженні тиску в циліндрі в момент зрівноваження тисків мембрана відходить від верхнього

обмежника, контакт 1 розмикається, викликаючи повторний електричний сигнал.

Для запису низьких тисків, особливо при індицируванні насосних ходів, рекомендується застосовувати датчики, де верхній обмежник виконують із плоскою поверхнею (рис. 14.4,б). Тоді під дією тиску знизу діафрагма не деформується, а відрив її від контактної штифта відбувається за тиском, що не перевищує 0.01 МПа замість звичайних для них 0.03...0.05 МПа.

14.3 Помилки індицирування

Унаслідок того, що в каналі, що з'єднує циліндр двигуна зі сприймаючим тиск елементом індикатора, створюється гідравлічний опір течії газу, при знятті індикаторних діаграм виникає деяка різниця тисків у циліндрі двигуна й у порожнині каналу біля елемента індикатора, що сприймає тиск. Величина цієї різниці тисків залежить від форми, довжини й площі поперечного перерізу каналу, швидкості зміни тиску в циліндрі і від величини тиску в циліндрі. Приблизна величина похибки від гідравлічного опору, що виникає при проходженні газів у з'єднувальному каналі, МПа, визначається за формулою

$$\Delta p_{ik} = [n/(125 \cdot 10^6)] \cdot (l_k / d) \cdot p_z, \quad (14.7)$$

де n - частота обертання вала двигуна, хв^{-1} ;

l - довжина з'єднуючого каналу, м;

d - діаметр з'єднуючого каналу, м;

p_z - тиск наприкінці згоряння, МПа.

Крім гідравлічного опору протіканню газів, у сполучному каналі можуть виникнути коливання тиску, частота яких визначається за формулою (14.6). Частота власних коливань, обумовлена за формулою (14.6) повинна бути вище за частоту власних коливань чуттєвого елемента датчика.

При записах тисків стробоскопічними індикаторами визначені похибки виникають унаслідок витрати часу на подолання мембраною датчика відстані між її обмежниками. Час руху сталеві мембрани можна визначити за формулою

$$t_m = 3.06 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_m \cdot \delta}{\omega_p}}, \quad (14.8)$$

де S_m - максимальний хід центра мембрани, м;

δ - товщина мембрани, м;

ω_p - швидкість наростання тиску, МПа/с.

Отже, тривалість переміщення мембрани зменшується зі зменшенням її ходу й товщини і зі збільшенням швидкості зміни тиску. Очевидно, що при записі лінії підвищення тиску її зображення на діаграмі запізнюється по фазі порівняно з істинним значенням, а лінія розширення випереджає її.

Дуже значний вплив на діаграму робить помилка, допущена при нанесенні відмітки ВМТ. Так, у результаті зсуву на діаграмі ВМТ на 1 градус повороту колінчастого вала, помилка при визначенні індикаторної потужності досягає 3 %. Величина відхилення відмітки ВМТ за умови ретельного її визначення може бути зведена до 0.15 град, що дає можливість зменшити помилку при визначенні індикаторної потужності двигуна до 0.6...0.9 %.

У випадку планіметрирування індикаторної діаграми також можливі помилки у визначенні індикаторної потужності, що складають приблизно 0.5 %. Величина помилки внаслідок інерції рухливих частин індикатора й помилки настроювання індикатора на заданий режим роботи складає приблизно 0.55 %.

Таким чином, сумарна величина помилки, що допускається при визначенні індикаторної потужності двигуна точечною індикаторною діаграмою, у середньому не перевищує 2 %. Тоді як електричні індикатори допускають визначення індикаторної потужності з набагато більшою помилкою.

ЛАБОРАТОРІЇ ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНІВ

15.1 Загальні вимоги до лабораторій

Сучасні лабораторії для випробувань двигунів являють собою спорудження зі складним інженерним устаткуванням. Вимоги, яким вони повинні задовольняти, обумовлюються метою випробувань і методикою, покладеної в основу технології їхнього проведення, а також необхідністю створення санітарно-технічних і безпечних умов праці для персоналу випробувачів, забезпечення пожежної безпеки й ін.

Устаткування випробувальних стендів і допоміжних пристроїв повинне забезпечувати проведення випробувань цілком за встановленою програмою з мінімальними витратами часу на виконання монтажно-демонтажних і інших підготовчих робіт і з точністю вимірювання окремих параметрів, що допускається для даного виду випробувань.

Санітарно-технічні вимоги передбачають забезпечення лабораторних приміщень ефективною приточно-витяжною вентиляцією, необхідної для технічних цілей і з виключенням можливості забруднення їхньої атмосфери шкідливими речовинами вище допустимої концентрацію, створення необхідних побутових зручностей для обслуговуючого персоналу.

Вимоги техніки безпеки і пожежної безпеки передбачають заходи, що виключають травматизм і виробничі захворювання, забезпечення персоналу захисними пристосуваннями й спецодягом, заходими щодо запобігання вибухів і пожеж у лабораторії. Матеріали, що йдуть на виготовлення підлог і покриттів внутрішніх стін, повинні бути протиспрацьовувальні, вогнестійкі й непроникні для палива й мастила.

15.2 Випробувальні установки

Установки для випробувань двигунів являють собою комплекс, що складається з гальмового пристрою, фундаменту з під моторною плитою, спеціальних стійок кріплення двигуна, сполучного вала передачі крутного моменту від двигуна до гальма, пульта керування з контрольно-вимірювальними приладами, додаткових пристроїв, що забезпечують проведення випробування за заданою програмою.

Фундамент стендів найчастіше виконують у вигляді монолітного бетонного блоку, не зв'язаного жорстко з фундаментом будівлі лабораторії. Вертикальні коливання фундаменту знижують шляхом розміщення пружного прошарку між основною його масою й підшоною. Від передачі горизонтальних коливань спорудження захищають за допомогою 10...15 см повітряного проміжку, яким відокремлюють від них фундамент випробувальної установки.

Сполучний вал часто виконують у виді короткого двошарнірного карданного вала звичайного автомобільного типу з телескопічним шліцьовим зчленуванням однієї з вилок шарніра з наконечником вала.

15.3 Автоматизовані стенди з програмним керуванням

Автоматизовані стенди з програмним керуванням найбільш ефективні при використанні їх для виконання наступних робіт: випробувань двигунів, систем і їхніх агрегатів на надійність, довговічність, а також на токсичність при моделюванні експлуатаційних режимів; випробувань мастил з різними присадками; дослідження робочого процесу двигуна і його зносу при роботі на перехідних режимах; імітації експлуатаційних режимів роботи двигуна.

Стенди з програмним керуванням, звичайно, мають автоматичну апаратуру для виміру й реєстрації параметрів двигуна, які контролюються. Найменша кількість параметрів, що забезпечує задовільну роботу двигуна у заданих межах досягає п'яти. До них відносять: частоту обертання колінчастого вала, навантаження, температури охолодної рідини й мастила, тиск при впуску й протитиск при випуску відпрацьованих газів.

В якості гальм для автоматизованих стендів, звичайно, застосовують або електричні гальма постійного чи перемінного струму, або індукторні гальма, що забезпечують широкі можливості відносно меж регулювання.

Останнім часом у якості регулювального пристрою використовуються різного типу електронно-обчислювальні машини. Для завдання й витримування заданих значень параметрів двигуна стенд забезпечується системою керування. На рисунку 15.1 приведена принципова схема автоматизованого стенда для випробувань двигунів внутрішнього згоряння.

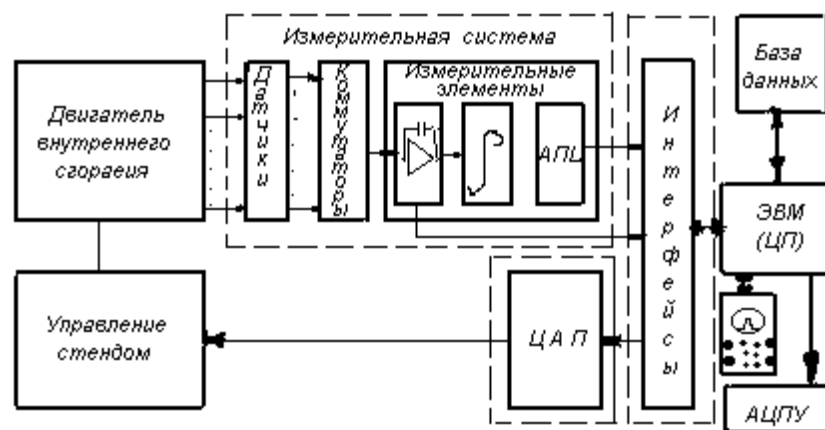


Рисунок 15.1 - Схема автоматизованого стенда для випробувань двигунів внутрішнього згоряння

Початковою ланкою руху інформації є вимірювальна система. Первісними джерелами інформації про значення вимірюваних параметрів служать датчики. Датчики найчастіше видають сигнал в аналоговій формі. Якщо сигнал від датчика не електричний, його намагаються перетворити в електричний (токовий чи потенційний), якщо сигнал слабкий, то його підсилюють.

Сигнали від датчиків надходять на вимірювальні пристрої, що мають, як правило, цифрову індикацію і цифрове представлення результату на виході. Вузол, що переводить аналогову інформацію в цифрову, зветься аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Для керування експериментальною установкою, цифрову інформацію, як правило, перетворюють в аналогову за допомогою цифрово-аналогових перетворювачів (ЦАП).

З метою економії устаткування часто датчики по черзі підключають до вимірювальних пристроїв через комутатори.

Наступною частиною системи є вузол обробки й керування. Він містить у собі процесор, оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) і систему математичного забезпечення (ЕОМ-ЦП). Процесор здійснює обробку даних за заданим алгоритмом. В оперативній частині ОЗП містяться дані для обробки, програми обробки результатів вимірювання і проміжні результати. У зовнішніх запам'ятовуючих пристроях (ЗЗП), крім того, зберігаються результати для утворення банку даних (БД).

Крім того, ще є пристрої введення-виходу інформації й система спілкування з експериментатором на дисплеї для зручності сприйняття даних на основі алфавітно-цифрової печатки (АЦПП) і графобудівника. Для можливості з'єднання пристроїв між собою вироблені стандарти на сполучення - інтерфейси. Головний інтерфейс системи - це стик між ЕОМ і вимірювальною частиною. У випадку, якщо будь-які вузли чи блоки системи не мають стандартного інтерфейсу, вони підключаються через адаптери (перехідники).

АКРЕДИТАЦІЯ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ

16.1 Основні положення

Акредитацію лабораторії проводять із метою офіційного визнання її технічної компетенції у проведенні вимірювання показників конкретних об'єктів чи за конкретними видами (методикам) вимірювання при випробуваннях двигунів внутрішнього згорання.

При акредитації лабораторії може бути визнана її об'єктивність, тобто незалежність її висновків.

Органами, що проводять акредитацію лабораторій є територіальні органи Держстандарту України і метрологічні служби міністерств, відомств і уповноважених ними підприємств, установ і організацій.

Результати вимірювання і випробувань, що отримані акредитованою лабораторією, підлягають офіційному визнанню для усіх видів робіт, включаючи арбітражні й міждержавні.

Лабораторія може бути акредитована на термін, що не перевищує 5 років.

16.2 Критерії акредитації лабораторії

Критеріями акредитації лабораторії на технічну компетентність є:

- наявність умов, що забезпечують технічну компетентність;
- позитивні результати експериментальної перевірки якості на проведення робіт;

Умовами, що забезпечують технічну компетентність лабораторії, є:

- 1) наявність затвердженого положення про лабораторію;
- 2) наявність необхідних засобів вимірювання (у тому числі нестандартних), лабораторного випробувального й допоміжного устаткування,

їхня відповідність вимогам щодо методик виконання вимірювання і випробувань;

3) наявність підтверджень про придатність до застосування засобів вимірювання (ЗВ) і випробувального устаткування лабораторії (свідчень про перевірку, атестацію);

4) наявність документації з обліку засобів вимірювання, випробувального устаткування, графіки їхньої перевірки й атестації, їхнього обслуговування, відповідність монтажу, установки, умов експлуатації й збереження засобів вимірювання, забезпечення їхньої постійної готовності до проведення вимірювання і випробувань із необхідною точністю;

5) наявність системи контролю результатів вимірювання, що реалізує принципи, норми, правила, вимоги й процедури забезпечення єдності вимірювання і документально викладеної у виді стандарту підприємства, положення чи методики контролю якості (точності) вимірювання;

6) наявність фахівців, що забезпечують виконання вимірювання і випробувань у встановленому обсязі і таких, що мають достатню професійну підготовку;

7) наявність затверджених посадових інструкцій і документів із питань підвищення кваліфікації персоналу;

8) наявність затверджених інструкцій з охорони праці й техніки безпеки;

9) Відповідність приміщення лабораторії умовам проведення вимірювання і випробувань, у тому числі відповідність вимогам техніки безпеки, охорони здоров'я і навколишнього середовища.

Лабораторія повинна відповідати наступним вимогам:

- бути окремою структурою в складі свого підприємства чи організації;
- керівники лабораторії повинні мати достатні права для керівництва лабораторією.

16.3 Порядок проведення акредитації лабораторії

Лабораторія направляє в орган акредитації офіційну заявку встановленого зразка, до якої додає наступні документи:

- положення про лабораторію;
- паспорт лабораторії;
- положення про якість.

Зразки документів, що приведені в рекомендації Державної системи забезпечення єдності вимірювання Держстандарту України "Аккредитация аналитических, измерительных и испытательных лабораторий" Р50-062-95, відповідають вимогам таких нормативних документів:

1. ГОСТ 8.010-90 ГСИ. Методики выполнения измерений.
2. ГОСТ 8.326-89 ГСИ. Метрологическая аттестация средств измерений.

Орган акредитації протягом місяця перевіряє документи і за результатами експертизи приймає рішення про проведення акредитації. Акредитація проводиться комісією, куди крім фахівців у даній області можуть бути включені і представники Мінприроди, Санепідемнагляду й др. За результатами перевірки складається акт і орган акредитації приймає рішення про акредитацію лабораторії. При позитивному рішенні лабораторії видається атестат акредитації встановленого зразка.

16.4 Функції, права й обов'язки акредитованої лабораторії

Акредитована лабораторія може брати участь у проведенні арбітражного аналізу, робіт, за результатами яких можуть застосовуються санкції при контролі продукції чи параметрів навколишнього середовища, робіт із перевірки діяльності інших акредитованих лабораторій.

Лабораторія має право посилатися на факт акредитації у видаваних документах і рекламних матеріалах, брати участь у розробці нормативних документів по акредитації, укладати договори на проведення конкретних робіт.

Лабораторія, зобов'язана протягом терміну акредитації відповідати критеріям акредитації, проводити тільки ті роботи, на які поширюється область акредитації, надавати органу по акредитації проводити нагляд за її діяльністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - М.: "Высшая школа", 1975. - 320 с.
2. Стефановский Б.С., Скобцов Е.А., Корси Е.К. Испытание двигателей внутреннего сгорания. - М.: "Машиностроение", 1972. - 367 с.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. - М.: "Энергия", 1978. - 703 с.
4. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 448 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. - М.: "Мир", 1981. - 375 с.
6. Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований. - М.: "Наука", 1983. - 391 с.
7. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. - М.: "Наука", 1987. - 319 с.
8. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: "Энергия", 1974. - 375 с.
9. Варламов Л.И. Испытательные станции поршневых и газотурбинных двигателей. - М.: Машгиз, 1963. - 172 с.
10. Глаголев Н.М. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - Харьков: Изд - во ХГУ, 1958. - 220 с.
11. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. проф. П.В. Новицкого. - Л.: "Энергия", 1975. - 576 с.
12. Монахов В.И. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара. - Л., М.: "Энергия", 1962. - 128 с.
13. Левин В.М. Расходомеры малых расходов для схем промышленной автоматики. - М.: "Энергия", 1972. - 73 с.

14. Алабин М.А., Ройтман А.Б. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении. - М.: "Машиностроение", 1974. - 123 с.
15. Рого К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. - К.: "Техника", 1987. - 128 с.
16. Розенблит Г.Б., Виленский П.И., Горелик Я.И. Датчики с проволочными преобразователями для исследования двигателей внутреннего сгорания. - М.: "Машиностроение", 1966. - 134 с.
17. Осипович Л.А. Датчики физических величин. - М.: "Машиностроение", 1979. - 159 с.
18. Сомов В.А., Кузьменков О.П., Солдатов В.К. Электрические индикаторы и их применение при испытаниях судовых ДВС. - Л.: "Морской транспорт", 1958. - 218 с.
19. Рекомендации Р50-062-95. Аккредитация аналитических, измерительных и испытательных лабораторий. - К.: ГОССТАНДАРТ УКРАИНЫ, 1995 - 25 с.