

Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича  
Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

## **ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

прилади та поліграфія

*Навчальний посібник до лабораторного практикуму*



Чернівці  
2021

ББК 34.42  
К65  
УДК 681.2

*Рекомендовано Вченою радою*

К65 *Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича*

**Функціональні перетворення в технічних системах:**

прилади та поліграфія. Навчальний посібник до лабораторного практикуму / Укл.: О.В. Ангельський, В.Г. Житарюк, К.Ю. Зенкова – Чернівці: Рута, 2021. 56 с.

Робота довільної технічної системи, в тому числі і приладу, визначається фізичним принципом, що лежать в основі його функціональної ідеї. Цей принцип може бути однорідним, як-от механічним, електричним (інше), так і комбінованим, наприклад, електромеханічним, оптико-механічним або ж ще складнішим. Вибір принципу та наступний розрахунок перетворень вхідної інформації – начало розрахунків функціональної ідеї технічної системи.

Навчальний посібник має за мету накреслити шлях отримання функції перетворення сигналу на прикладі механічних та електронних систем, вивчати та досліджувати методи та методики розрахунків та аналізу таких перетворень. Разом з цим тут поставлене питання точності роботи приладів. Наведена теоретична канва, яка забезпечує аналітичний аналіз функціональної структури приладів та точності їх роботи.

Зміст посібника включає три теми та відповідно три лабораторних роботи: 1) розрахунок та перетворення інформації засобами механіки; 2) дослідження перетворень електронними вимірювальними приладами на прикладі вакуумметра як двопараметричного вимірювального приладу; 3) дослідження точності роботи механічних приладів лінійних вимірювань на прикладі індикатора годинниково-го

Для студентів спеціальностей, які навчаються за напрямками , «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», «Телекомунікації», «Видавництво та поліграфія», а також фахівців з проектування і експлуатації приладів.

К  $\frac{2706000000-514}{038(01)-87}$  279-86

ББК 34.42  
6П15.8

© Видавництво “Рута” Чернівецького національного університету, 2021

## Зміст

### Тема 1. Функціональні перетворення механічними системами

#### Аналітична частина

1.1. Перетворення руху складними механізмами: основні положення .....	5
1.2. Передумови встановлення функції перетворення руху (ФПР).....	6
1.3. Встановлення ФПР методом підстановки.....	7
1.3.1. Конструктивний вигляд механізму.....	7
1.3.2. Підготовчі процедури.....	8
1.3.3. Процедура встановлення ФПР методом підстановки.....	10
1.4. Встановлення ФПР методом передаточних функцій на прикладі трубчатого манометра.....	11

#### Лабораторна робота № 10

#### Встановлення функцій перетворення руху складними механізмами

Мета, завдання до роботи.....	16
Методика виконання.....	17
Контрольні запитання.....	18

### Тема 2. Функціональні перетворення електронними вимірювальними системами

#### Аналітична частина

2.1. Функціональна структура приладів.....	19
2.2. Рівнева модель функціональної структури.....	19
2.2.1. 1-й рівень: перетворення первинного фізичного поля: датчики фізичних величин.....	20
2.2.2. 2-ий рівень: функціональні перетворення сигналу (ФПС).....	21
2.2.3. 3-ій: рівень підсилення перетвореної величини.....	22
2.2.4. 4-ий: рівень технологічних функцій.....	22
2.2.5. 5-ий: рівень забезпечення та керування.....	22
2.2.6. 6-ий: рівень надійності та захисту.....	24
2.3. Захист технічної системи та оточення.....	25
2.3.1. Захист від кліматичних впливів в цілому та від вологи зокрема.....	25
2.3.2. Захист персоналу від дій електрики.....	26
2.3.3. Захист приладів від теплових навантажень.....	26
2.3.4. Захист від електромагнітних полів.....	28
2.3.5. Захист технічних систем (ТС) від механічних впливів.....	33

## **Лабораторна робота № 11**

### **Дослідження функціональної структури вакуумметра ВИТ-2**

Мета, завдання до роботи.....	35
Методика виконання.....	35
Контрольні запитання.....	37

#### **Додаток А. Інструкція з експлуатації вакуумметра**

1. Технічне описання ВИТ-2	
1.1. Призначення та застосування.....	38
1.2. Технічні характеристики.....	38
2. Принцип дії	
2.1. Термопарна частина вакуумметра (низький вакуум).....	39
2.2. Іонізаційна частина вакуумметра (високий вакуум).....	40
2.3. Блок-схема вакуумметра.....	41
3. Інструкція з експлуатації	
3.1. Термопарна частина вакуумметра (низький вакуум) .....	43
3.2. Іонізаційна частина вакуумметра (високий вакуум).....	44

## **Тема 3. Точність роботи приладів**

### **Дослідження на прикладі індикатора годинникового типу ІЧ**

#### **Аналітична частина**

3.1. Кінематична схема механізму.....	45
3.2. Функція перетворення руху.....	47
3.3. Розрахунки параметрів ланок механізму .....	47
3.4. Похибки механізму	
3.4.1. Теоретична похибка параметрів.....	48
3.4.2. Технологічні похибки.....	49

## **Лабораторна робота № 12**

### **Дослідження характеристик точності індикатора годинникового**

Мета, завдання до роботи.....	50
Методика виконання.....	51
Контрольні запитання.....	53

#### **Додаток Б. Розрахунок похибок роботи трубчатого манометра.....**

Список літератури .....	55
-------------------------	----

# Тема 1. Функціональні перетворення механічними системами

## Аналітична частина

### 1. Перетворення руху складними механізмами

#### 1.1. Вступні положення

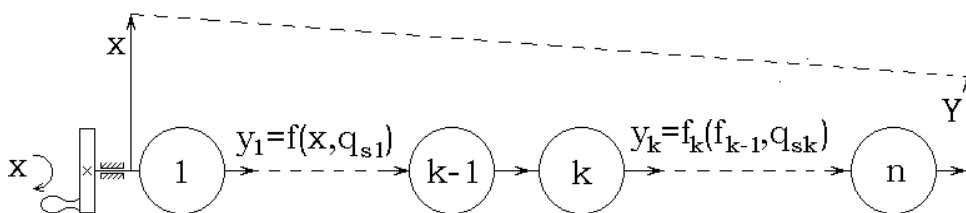
При розгляді перетворень руху механічними системами використовується поняття «Функція перетворення руху» (ФПР), але при наявності комбінованих принципів перетворення інформації доцільним є використання тезису «Функція перетворення сигналу» (ФПС) – це властивість технічної системи виконувати необхідні перетворення вхідного сигналу, які забезпечать виконання основної функції цієї системи.

Нехай  $x$  – первинне фізичне збурення на вході рівня функціональних перетворень приладу, а  $Y$  – його кінцева реакція. Перетворення  $F$ , які здійснюються цим рівнем, записуються так:

$$Y = F(x, q_{sn}) \quad (1.1)$$

Тут:  $q_{s, n}$  – конструктивні параметри кожного  $s$  – елемента  $n$  – ланки ланцюга перетворення сигналу.

В загальному в приладах можливим є довільне сполучення ланок перетворення сигналу, однак переважним є послідовне сполучення, спрощена структурна схема якого з вхідним збуренням у вигляді обертового руху маховика подається на рис. 1.1.



**Рис.1.1. Структурна схема перетворення сигналу при послідовному сполученні елементарних ланок перетворень:**

$1, \dots, k, \dots, n$  – структурні ланки перетворення;  $y_i = f_i(y_{i-1}, q_{sn})$  – функції перетворення сигналу окремих ланок,  $q_{sn}$  – конструктивні (геометричні) параметри окремої  $s$  – комірки  $i$  – ланки

В такому разі кінцеву ФПС приладу можна одержати методом послідовних підстановок:

$$Y = F(x, q_{sn}) = f_n(y_{n-1}, q_{sn}) = f_n \{f_{n-1}, \dots, f_2 [f_1(x, q_{s1})]\} \quad (1.2)$$

Тут:  $f_n$  – функція перетворення сигналу  $n$  – ланкою.

В реальних конструкціях при наявності множини ланок перетворення сигналу використання методу за (1.2) досить ускладнене. Спрощенню підлягають системи з лінійним перетворенням в межах окремої ланки. Можна показати, що в цьому разі ФПС записується у вигляді добутку передаточних чисел кожної ланки перетворення сигналу. Математично:

$$Y = x \prod_{k=1}^n i_k. \quad (1.3)$$

Тут:  $x$  – вхідна координата,  $i_k$  – передаточне число для  $k$  - ланки із множини  $\{1 \div n\}$  ланцюга перетворень.

Акцентуємо, співвідношення (1.3) справедливе при умові, що  $i_k$  є постійна величина для кожної із ланок в межах зміни  $x$ .

На рис.1.1. рух вхідної ланки як координата  $x$  та вихідний функціональний рух  $Y$  умовно зображено у вигляді векторів, причому  $x > Y$ . Таке співвідношення  $x$  та  $Y$  характерне для більшості оптичних систем позиціонування, в яких межі переміщення вхідної ланки значно більші аналогічних меж вихідної.

## 1.2. Передумови встановлення ФПР

Виведенню функцій перетворення рухів довільних механізмів передують комплекс підготовчих робіт, який зводиться до таких трьох кроків.

**Перший.** Відповідно до конструктивного вигляду необхідно розробити *принципову кінематичну схему* та подати її графічно у вигляді умовних зображень окремих елементів і ланок відповідно до стандартів ГОСТ 2.701-84, 2.703-68, 2.770-68, 2.721-74. Кінематичні схеми залежно від основного призначення поділяють на структурні, функціональні та принципіві.

*Структурні кінематичні схеми* подаються у вигляді простих геометричних фігур (квадрат, прямокутник, круг і т. і.), які демонструють усі основні частини виробу та їх основні функціональні зв'язки. Всередині геометричних фігур указують найменування функціональних елементів виробу.

*Функціональна кінематична схема* у вигляді простих геометричних фігур відображає лише ті частини виробів, які забезпечують функціональні перетворення даною схемою та зв'язки між ними. Всередині кожної геометричної фігури вказують відповідні позначення або надписи. Нумерацію позначень здійснюють у послідовності функціональних перетворень. Якщо це не порушує наочності представлення,

то допускається подання функціональних структурних елементів у послідовності їх геометричної структури – їх дійсного розміщення у виробі.

*Принципова кінематична схема* подається з використанням умовних графічних позначень або спрощених контурних зображень, демонструє роботу механізму, керування, регулювання та контроль заданих рухів вихідної ланки. Схему будують без застосування масштабу, але зберігають співвідношення розмірів елементів. Як правило, кінематичну принципову схему виконують у вигляді розгортки; допускається її побудова в аксонометрії. Повну інформацію з даного питання подається в будь-якому посібнику з інженерної графіки, а також в стандартах, перелік яких наведений вище.

**Другий.** Здійснюється позначення всіх кінематичних зв'язків (кінематичні пари) окремих елементів, ланок та ланцюгів, починаючи з першого. Зазначимо, що вказані кінематичні зв'язки поділяються на *активні* та *пасивні*.

*Активні* – це такі, що спричиняють функціональні перетворення руху. Наприклад, зчеплення двох зубчатих коліс, взаємодія робочої поверхні кулачка з вихідною ланкою (наконечник кулачка чи коромисла).

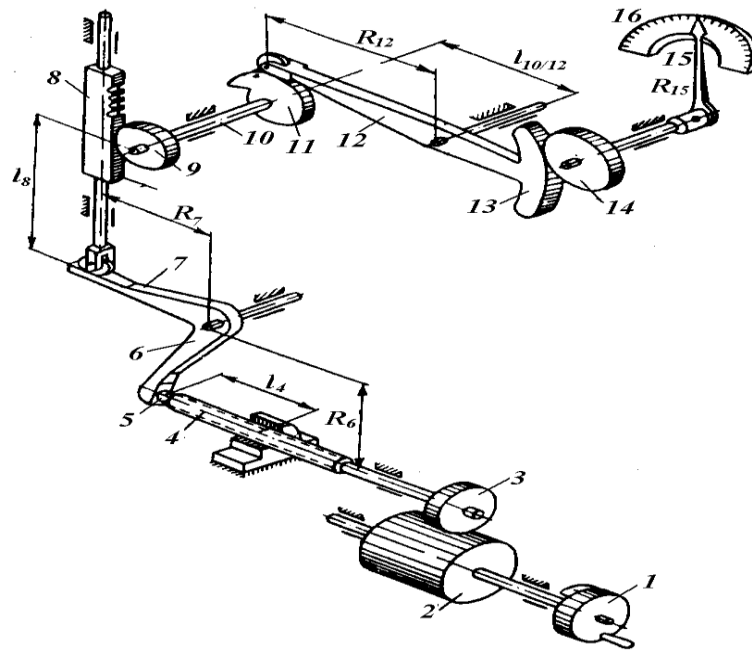
До *пасивних* відносять зв'язки, які орієнтують або спрямовують взаємне положення рухомих елементів. Окрім цього, вони застосовуються як для розвантаження окремих елементів конструкцій, так і для розосередження силових характеристик. Так, паралельне введення двох тотожних зубчатих коліс на один вал дозволяє не тільки зменшити навантаження на окреме зчеплення, але і вирівняти навантаження вздовж валу. Надлишкові пасивні елементи в *ТММ* інколи називають "*паразитними*".

**Третій.** Вибрати метод встановлення ФПС та провести відповідні дії. Відомі такі методи встановлення: 1) метод підстановки, 2), метод передаточних функцій, який демонструється в Додатку; 3) графо-аналітичний.

### **1.3. Встановлення функції перетворення руху методом підстановки**

#### **1.3.1. Конструктивний вигляд механізму**

Розглянемо механізм, конструктивний вигляд якого зображений у аксонометрії на рис.1.2.



**Рис. 1.2. Аксонометричне зображення конструктивного вигляду складного механізму:**

1 – рукоятка керування (маховик); 2,3 – зубчаті колеса; 4,4' – гвинтовий механізм (гвинт, гайка); 6,7 – важелі подвійного тангенсного механізму; 8,9 – зубчато-реечний механізм; 11,12 – кулачково-коромисловий механізм; 13,14 – зубчато-секторний механізм; 15,16 – стрілка та шкала індикаторної системи.

Аналіз показує, що цей механізм складається із восьми послідовно сполучених ланок, утворених такими елементарними механізмами: зубчатим (колеса 2,3), гвинтовим (гвинт 4, гайка 4'), важільним (6 та 7), зубчато-реечним (рейка 8 та колесо 9), кулачково-коромисловим (11,12), зубчато-секторним (13,14), індикаторним (стрілка, шкала 15,16). У термінах *ТММ* аналіз даного складного механізму виявляє таку послідовність простих механізмів, починаючи від входу: трьох ланковий зубчато-гвинтовий (ланки 1,2 та 3,4); подвійний тангенсний (ланки 4,6 та 7,8); зубчато-реечний (ланки 8,9); кулачковий (ланки 10,11,12); зубчато-секторний (ланки 13,14); реєструючий (ланки 15,16).

### 1.3.2. Підготовчі процедури

Виведемо функцію перетворення руху цього механізму відповідно до рівняння (2). Попередньо необхідно підготувати дані про елементарні механізми, де почерпнемо інформацію про функцію перетворення руху.

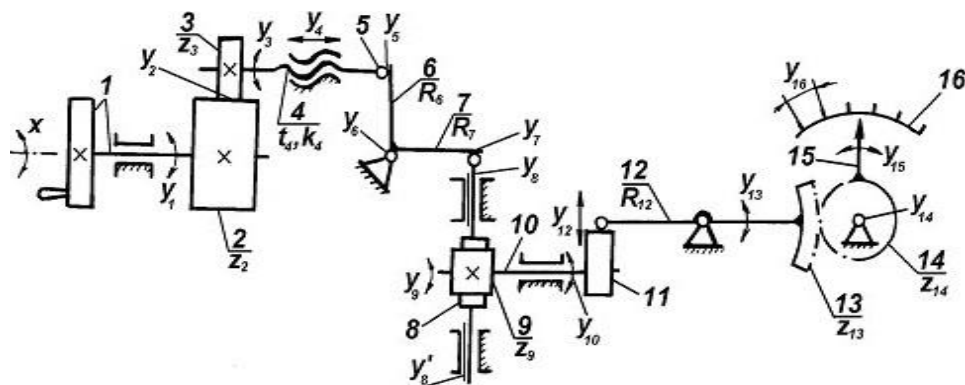
Перший крок у діях – це підготовлена принципова кінематична схема механізму в термінах стандартних умовних позначень, як це показано на рис.1.3.

Другим кроком є нумерація всіх кінематичних рухів та зв'язків, починаючи від вхідної ланки, як активних, так і пасивних.

Маємо таке:  $x$  – обертний рух вхідної ланки;  $y_1$  – обертова кінематична пара (вал 1 в опорі);  $y_2$  – кінематична пара, утворена зачепленням зубчатих коліс



$Z_2$  та  $Z_3$ ;  $y_3$  – обертова кінематична пара, утворена зовнішньою поверхнею гвинта та поверхнею внутрішньої нарізки (гайки);  $y_4$  – лінійне переміщення гвинта 4 з параметрами  $t_4, k_4$ ;  $y_5$  – кінематична пара, утворена поверхнями дотику наконечника гвинта 5 та поверхнею важеля 6;  $y_6$  – обертова кінематична пара кутового важеля з плечиками 5, 6, довжина яких відповідно  $R_6$  та  $R_7$ ;  $y_7$  – кінематична пара, утворена поверхнями дотику поверхнею важеля 7 та наконечника зубчатої рейки 8;  $y_8, y_8'$  – кінематичні пари, утворені поверхнями напрямних лінійного переміщення зубчатої рейки (одна з цих пар надлишкова (пасивна), яка забезпечує стійкість конструкції при переміщенні рейки);  $y_9$  – кінематична пара, утворена зубчатим зчепленням рейки 8 та колеса  $Z_9$ ;  $y_{10}$  – обертова кінематична пара, утворена поверхнею валу 10 та опорою обертання; 11 – кулачок;  $y_{12}$  – точкова або лінійна кінематична пара контакту робочої поверхні кулачка з поверхнею наконечника важеля 12;  $y_{13}$  – обертання важеля 12 на опорі;  $y_{14}$  – обертання зубчатого колеса 14 на опорі;  $y_{15}$  – зубчате зачеплення сектора 13 та колеса 14;  $y_{16}$  – віртуальний зв'язок наконечника стрілки та шкали.



**Рис. 1.3. Кінематична схема механізму, зображеного на рис. 2**  
(специфікація в тексті)

Увага! Названі кінематичні зв'язки за деякими винятками одночасно представляють координати переміщення відповідних ланок; такими винятками є кінематичні зв'язки зубчатих зачеплень.

Третій крок – виявлення параметрів кожної ланки механізму та присвоєння їм відповідних позначень у вигляді індексованих букв. Номери букв переважно мусять відповідати номеру ланок кінематичного ланцюга.

### 1.3.3. Процедура встановлення функції методом підстановки

Встановлення функції перетворення руху здійснюється в оберненій послідовності, починаючи від *вихідної* ланки. У нашому випадку – це *система індикації*. Переміщення кінця стрілки по дузі буде:  $y_{16} = R_{15} y_{15}$ . Тут  $y_{15}$  – кут повороту стрілки (у радіанах),  $R_{15}$  – довжина стрілки, від осі до загостреного вказівника.

Кути повороту ланки 15 та ланки 14 тотожні, так як стрілка нерухомо з'єднана із зубчатим колесом. Отже,  $y_{15} = y_{14}$ .

Для *зубчато-секторного* механізму кут повороту  $y_{14}$  ланки 14 пов'язаний з кутом повороту  $y_{13}$  ланки 13 залежністю  $y_{14} = (z_{13}/z_{14})y_{13}$ , де  $z_{14}$  – число зубців колеса 14, а  $z_{13}$  – повне число зубців зубчатого колеса, частиною якого є зубчатий сектор 13.

Для *кулачкового* механізму, коромисло 12 якого складає єдину ланку (важіль) із зубчатим сектором 13, приймаємо, що профіль кулачка 11 виконаний по спіралі Архімеда з кроком  $T_{11}$ , суть якого – приріст радіуса спіралі на повному циклі обертання, тобто за  $2\pi$ -радіан. Тоді лінійне переміщення важеля  $y_{12}$  буде:

$y_{12} = \frac{T_{11}}{2\pi} y_{10}$ , а кут повороту важеля 12 (з довжиною плеча  $R_{12}$ ) а отже, і сектора

13, буде:  $y_{13} = \frac{y_{12}}{R_{12}}$ . Здійснюючи підстановки отримаємо:

$$y_{13} = \frac{T_{11}}{2\pi R_{12}} y_{10}. \quad (1.4)$$

Зубчате колесо 9 нерозривно з'єднане з валом 10 та кулачком 11. Це означає, що  $y_{10} \equiv y_9$ .

Для *зубчато-ресного* механізму кут повороту колеса  $y_9$  пов'язаний з лінійним переміщенням рейки  $y_8$  такою залежністю:

$$y_9 = \frac{2}{z_9 m_9} y_8, \quad (1.5)$$

де  $z_9$ ,  $m_9$  – число зубців і модуль колеса 9.

Для подвійного *тангенсного* механізму вважаємо, що при початковому положенні важелі 6, 7 утворюють прямі кути зі своїми штовхачами. Очевидно, що  $y_8 \equiv y_7$ , та  $y_5 \equiv y_4$ . Кут повороту важелів  $y_6$  пов'язаний з лінійним переміщенням наконечників штовхачів такими співвідношеннями:

$$y_7 = l_7 \operatorname{tg} y_6, \quad y_5 = l_6 \operatorname{tg} y_6, \quad (1.6)$$

де  $l_6$  та  $l_7$  – відповідні довжини плечей коромисла.

Виключаючи з обох рівнянь  $\operatorname{tg} y_6$ , отримаємо:

$$y_7 = (l_7/l_6)y_5, \quad \text{або} \quad y_8 = (l_7/l_6)y_4. \quad (1.7)$$

Для гвинтового механізму маємо:

$$y_4 = \frac{k_4 t_4}{2\pi} y_3, \quad (1.8)$$

де  $k_4$  – число заходів гвинта,  $t_4$  – крок гвинта.

Для зубчатого зчеплення коліс 2,3:

$$y_3 = (z_2/z_3)y_1. \quad (1.9)$$

За наявності кругової шкали (лімба) на маховику 1:

$$y_1 = \left(2\pi/n\right)x, \quad (1.10)$$

Тут:  $n$  – кількість проділок по замкнутому колу,  $2\pi/n$  – ціна проділки лімба в радіанах,  $x$  – кількість проділок, зчитаних у деякому проміжному положенні по лімбі маховика від початку відліку.

Використовуючи метод послідовних підстановок із заміною проміжних координат внутрішніх ланок кінематичного ланцюга механізму, отримаємо переміщення кінця стрілки в лінійній мірі (довжина дуги) при обертанні маховика на  $x$  проділок:

$$y_{16} = \frac{R_{15} z_{13} T R_7 t_4 k_4 z_2}{\pi z_{14} R_{12} z_9 m_9 R_7 z_3 n} x. \quad (1.11)$$

Отже, використовуючи (1.11), при заданих межах обертання маховика як вхідної ланки та індикаторної стрілки як вихідної, можна розрахувати ціну проділки індикаторної шкали та їх кількість.

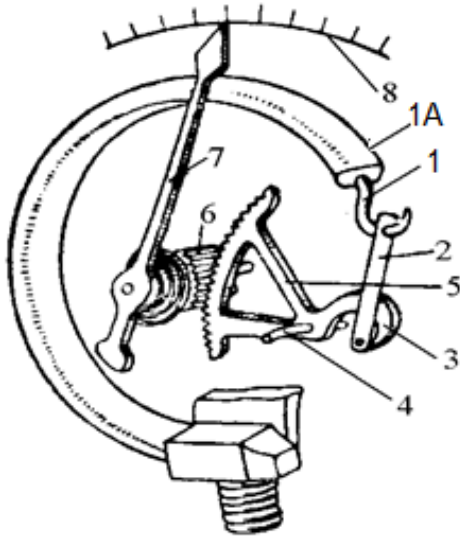
#### 1.4. Встановлення функції перетворення руху методом передаточних функцій на прикладі трубчастого манометра

Проведемо розрахунок ФПС механічного манометра, що використовується для вимірювання тиску газів і рідин, конструктивний вигляд якого подається на рис. 1.4. Датчиком тиску тут виступає сегмент металевої пружної трубки у поперечним перетином овальної форми. Один її кінець є базовим і впаяний у різьбовий штуцер. З його допомогою порожнина трубки з'єднується із середовищем, тиск якого підлягає вимірюванню. Під дією різниці зовнішнього  $p$  та внутрішнього  $p_0$  тисків еліптичний перетин трубки прагне набути круглої форми, внаслідок чого заглушений вільний кінець переміщується по деякій траєкторії. Це переміщення посередництвом передаточних ланок 2, 3, 5, 6 перетворюється в обертотий рух стрілки 7; відлік тиску здійснюється по шкалі 8. Кутове переміщення

$\psi$  вільного кінця трубчатої пружини в межах пружності матеріалу, з якого вона виготовлена, визначається так:

$$p - p_0 = C\psi. \quad (1.12)$$

Тут  $C$  – жорсткість пружини, яку вважають постійною в межах пружності її матеріалу. Насправді ця величина змінюється як при зморенні матеріалу, так і



**Рис. 1.4. Конструктивний вигляд механічного манометра:**

1 – шарнірний наконечник манометричної трубки; 2 – тяга (шатун); 3 – хвостовик зубчатого сектора (кривошип); 4 – вісь обертання зубчатого сектора; 5 – зубчатий сектор; 6 – триб механізму обертання стрілки; 7 – стрілка; 8 – шкала

чають через  $\Delta u_{\Delta q}$ .

Для встановлення функції перетворення сигналу перейдемо від загального вигляду механізму (рис. 1.4) до його принципової кінематичної схеми – рис. 1.5. З погляду ТММ, цей механізм складається з таких простих механізмів:

повзунковий (ланки 1, 1А); кривошипно-шатунна передача (ланки 2, 3); зубчато-секторна передача (ланки 5, 6); індикаторна система (ланки 7, 8). Під входньою координатою  $x$  розуміємо різницеий тиск  $(p-p_0)$ , під дією якого вільний кінець трубчатої пружини (вхідна ланка 1) здійснює рух по дузі; оскільки це переміщення незначне, то в кінематичній схемі воно замінюється рухом повзуна по прямій лінії. Очевидно, що  $x' = R_{mp}\psi$ . Тоді, з урахуванням (1.12), буде:

$$x' = \lambda R_{tr}(p-p_0), \quad (1.13)$$

де  $\lambda = 1/C$ , а  $R_{tr}$  – радіус кривизни трубчатої пружини.

при зміні температурних умов експлуатації, що накладає низку спеціальних вимог до матеріалу пружини. Похибки вимірювання тиску, які виникатимуть від указаних змін, належать до групи похибок експлуатації  $\Delta u_{\Delta t}$ . Правила позначення елементів механізму зберігаємо згідно з рис. 1.4. Координати  $y_i$  означають як реальні переміщення ланок механізму, так і кінематичні зв'язки, тобто кінематичні пари. Так, виділяються пари  $y_1, y_4, y_5, y_6$ , хоча  $x \equiv y_1, y_3 \equiv y_4, y_6 \equiv y_7$ . Необхідність такого виділення полягає в потребі обліку похибок функціонування механізму внаслідок неточності виготовлення цих кінематичних зв'язків, відомих у теорії точності як технологічні (первинні) похибки, які позначають через  $\Delta u_{\Delta q}$ .

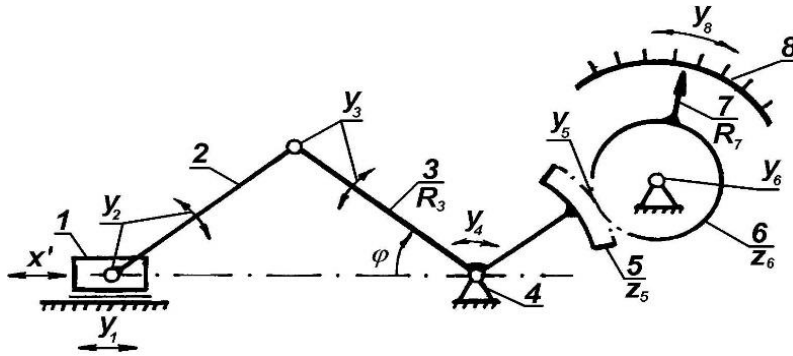


Рис. 1.5. Принципова кінематична схема манометра (специфікація в тексті)

Повзун 1 у сукупності з шатуном 2 та кривошипом 3 утворює кривошипно-повзунковий механізм. Вільний кінець кривошипа виконує функції зубчатого сектора 5, який утворює кінематичну пару з трибком 6. На вісь останньої насаджена стрілка 7, що переміщується по колу вздовж шкали 8.

Отже, для встановлення загального вигляду ФПС манометра необхідне знання функції перетворення руху кривошипно-шатуної передачі, кінематична схема якої зображена на рис. 1.6. Функцію перетворення руху ми запозичимо без доведення з теорії механізмів. Записуємо:

$$x = 2(R_3 + R_3^2/R_2)\sin^2(\varphi/2). \quad (1.14)$$

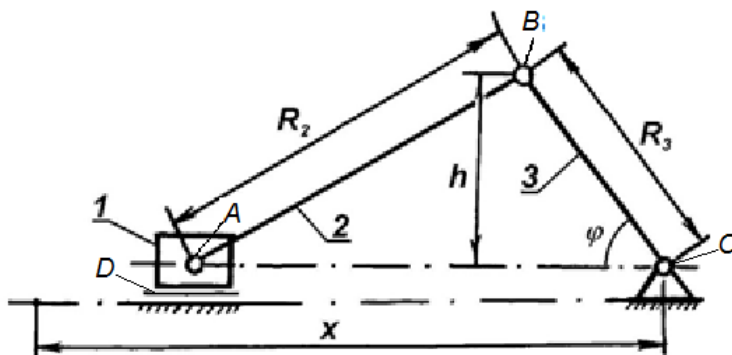


Рис. 1.6. Кінематична схема кривошипно-шатуної передачі: 1 – повзун; 2 – шатун; 3 – кривошип; А, В, С, D – кінематичні пари

Водночас можна показати, що швидкість руху повзуна пов'язана з лінійною швидкістю кінця кривошипа (точка В) так:

$$V_A = V_B(R_3 \sin 2\varphi / 2R_2 + \sin \varphi). \quad (15)$$

Передаточне відношення кривошипно-шатуного механізму - це відношення лінійної швидкості повзуна до лінійної швидкості кінця кривошипа.

Отже:

$$i_{\text{КШ}} = V_A / V_B = (R_3 \sin 2\varphi / 2R_2 + \sin \varphi). \quad (1.16)$$

Графічна форма залежності  $i_{\text{КШ}} = f(\varphi)$  подається на рис.1.7. З її ходу випливає, що в околі кутів  $60^\circ$  значення цієї величини близьке до одиниці.

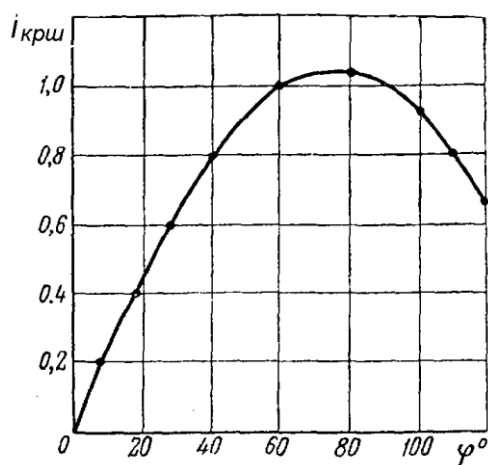
Отже, якщо конструктивно забезпечити зміну кута  $\varphi$  в околі  $60^\circ$ , то переда-

точне відношення кривошипа мало відрізнятись від одиниці, тобто  $i_{\text{крш}} \approx 1$ .

Це означає, що масштабні перетворення при русі кривошипно-шатунної частини механізму манометра не спостерігатимуть; роль цієї групи ланок зводиться до перетворення квазі поступального руху кінця трубчатого чутливого елемента в обертовий рух. Якщо уважно розглянути рис. 1.4, то бачимо, що вільний кінець зубчатого сектора 3, який виконує функцію кривошипа за рис.1.5, має специфічну дугоподібну форму, яка і забезпечує значення кута  $\varphi$  в околі  $60^\circ$ .

При використанні методу передаточних функцій загальна функція перетворення руху  $i$  визначається як добуток передаточних відношень послідовно сполучених ланок механізму.

Тоді: 
$$i = i_1 \times i_2 \times i_3. \quad (1.17)$$



**Рис. 1.7. Передаточне відношення кривошипно-шатунної передачі**

Тут:  $i_1 = (R_3 \sin 2\varphi / 2R_2 + \sin \varphi)$  – передаточне відношення кривошипно-шатунної передачі,  $i_2 = R_5 / R_3$  – передаточне відношення важеля, утвореного кривошипом 3 з довжиною  $R_3$  і радіусом  $R_5$  начального кола зубчатого сектора 5,  $i_3 = R_7 / R_6$  – передаточне число важеля, утворене відношенням плеча стрілки  $R_7$  до радіуса  $R_6$  начального кола трибки 6.

Використання методу передаточних функцій для встановлення ФПС допустиме лише у випадку постійності значень  $i_k$  при довільному положенні ланок механізму в межах циклу руху. Знову звертаючись до рис. 1.7, бачимо, що ця умова може виконуватися наближено лише в тому випадку, якщо конструктивно забезпечити таку конфігурацію ланок, при якій у межах робочого циклу кутів  $\varphi$  передаточне відношення  $i_1$ , буде близьке до одиниці.

Значення  $i_2, i_3$  для даного механізму - постійні.

За методом передаточних функцій перетворення сигналу механізму трубча-

того манометра буде:

$$Y = i x' = i_1 \times i_2 \times i_3 \times x'. \quad (1.18)$$

Враховуючи, що  $i_2 = R_5 / R_3$ ,  $i_3 = R_7 / R_6$  та значення  $x'$  за формулою (1.13), матимемо:

$$Y = i_1 \lambda R_{TP} (R_5 R_7 / R_3 R_6) (p - p_0). \quad (1.19)$$

Напишемо це співвідношення залежно від кількості зубців колеса зубчатого сектора 5 та зубчатого колеса 6, враховуючи, що  $R_5 / R_6 = z_5 / z_6$ . Тоді:

$$Y = i_1 \lambda R_{TP} (z_5 R_7 / z_6 R_3) (p - p_0). \quad (1.20)$$

Тут:  $z_5$  – повна кількість зубців колеса, з якого виготовлений сектор 5, а  $z_6$  – кількість зубців трибки 6.

Отже, формула (1.20) буде функцією перетворення сигналу трубчатим манометром тиску.

## Лабораторна робота № 9

### Встановлення функцій перетворення руху складних механізмів

#### МЕТА РОБОТИ:

- набуття навиків складання та читання кінематичних схем механізмів;
- оволодіння принципами встановлення функцій перетворення руху складними механізмами;
- оволодіння методами досліджень перетворення рухів механізмами.

#### ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ

1. За наявною діючою моделлю накреслити принципову кінематичну схему за вимогами стандартів на цупкому папері формату;
2. Провести частковий структурний аналіз і подати його у вигляді пояснювальної записки.
3. Скласти функцію перетворення руху механізму, починаючи від вхідної ланки і завершити вихідною, як це показано у *прикладі* виконання роботи..
4. Провести числові вимірювання параметрів перетвореного механізмом руху; за вхідну координату брати рух вхідної ланки, за вихідну – переміщення вихідної; для підвищення точності дослідження вхідну ланку переміщувати таку кількість циклів, яка забезпечить достатнє для числових відліків переміщення вихідної ланки.
5. Визначити параметр деякої ланки перетворення руху. Використовуючи функцію перетворення руху, здійснити її алгебраїчне перетворення таким чином, щоб зліва у виразі фігурував параметр, який підлягає дослідженню (указується керівником занять), а справа – інші параметри як числові коефіцієнти, помножений на дільник відношення руху вихідної ланки до вхідної ( $x/y$ ), що встановлюється дослідженням. За результатами вимірювань та при наявності функції перетворення руху визначити вказаний керівником занять параметр .



## Обладнання , пристосування, матеріали

Моделі механізмів, інструменти лінійних вимірювань (індикатор типу ІЧ, штангенциркуль, штанген-глибиномір)

### МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Отримати допуск до виконання роботи; необхідна умова допуску - наявність заготовки протоколу виконання роботи, у якій висвітлюється:

- назва, мета, завдання до роботи;
- основні терміни та визначення;
- виконане завдання за рубрикою 1 «Завдання до роботи».

2. Отримати моделі діючих механізмів, вимірювальний інструмент.

3. Виконати роботу за рубриками 1, 2, 3 «Завдання до роботи».

4. Вимірювання параметрів перетворення рухів механізмів провести за рубрикою 4 «Завдання до роботи».

5. Пояснення до визначення параметра деякої ланки перетворення руху проводиться на прикладі механізму, що аналізується у рубриці «Встановлення функції перетворення руху методом підстановки», наведеного у Аналітичній частині. Для вказаного механізму отримана функція перетворення руху (ф-ла (1.11)):

$$y_{16} = \frac{R_{15} z_{13} T R_7 t_4 k_4 z_2}{\pi z_{14} R_{12} z_9 m_9 R_7 z_3 n} x.$$

Практичне виконання роботи полягає у переміщенні (обертанні) вхідної ланки 1 (рис.1)  $x=2\pi n$ , тут  $n$  – кількість обертів, яка в свою чергу викликає переміщення покажчика стрілки на 1 (або іншу кількість) проділок. Далі, з деяким наближенням, так як рух по дузі замінюється лінійним переміщенням, проводиться лінійне вимірювання (у мм) однієї проділки, що і являє собою координату  $y_{16}$ . Нехай нам потрібно визначити модуль зубчатого колеса  $m_9$ . Для цього здійснимо перетворення виразу (1.11). Буде:

$$m_9 = \frac{R_{15} z_{13} T R_7 t_4 k_4 z_2}{\pi z_{14} R_{12} z_9 R_7 z_3 n} \left( \frac{x}{y_{16}} \right).$$

Отже, при наявності значень параметрів ланок механізму та проводячи експериментальні дослідження (результати в дужках), визначаємо  $m_9$ ; цим самим ми виконали умову завдання №5 до лабораторної роботи.

### **Протокол звіту містить:**

1. Програму роботи.
2. Конспект термінів і означень, приведених в аналітичній частині.
3. Кінематичні схеми механізмів, виконаних за аксонометричними зображеннями, пояснювальну записку з частковим структурним аналізом.
4. Кінематичні схеми діючих механізмів.
5. Аналіз механізмів:
  - a. призначення, характеристика механізмів. Виявлення вхідної та вихідної ланки та властивостей інверсії руху цих ланок;
  - b. кінематичні схеми механізмів;
  - c. отримані функції перетворення рухів механізмів.
6. Результати вимірювань у вигляді таблиць і графіків.
7. Визначені параметри кінематичних пар (або розмірів ланок механізмів) за рубриками завдання.
8. Висновки по кожному із механізмів, що підлягали дослідженням.

### **Контрольні запитання**

1. Назвати види кінематичних схем.
2. Чим різняться вищі кінематичні пари від нижчих?
3. Чим відрізняються складні механізми від простих?
4. Знати умовні графічні зображення основних кінематичних пар.
5. Які функції виконують механізми, що досліджувались в даній роботі?
6. Які основні характеристики або параметри гвинтових механізмів?
7. Які основні характеристики або параметри кулачкових механізмів?
8. Які основні характеристики або параметри зубчатих механізмів?
9. Яка послідовність встановлення функцій перетворення руху складних механізмів?
10. Який із механізмів, що розглядалися, можна використати для забезпечення довільного закону руху вихідної ланки?

# Тема 2. Функціональні перетворення електронними вимірювальними системами

## Аналітична частина

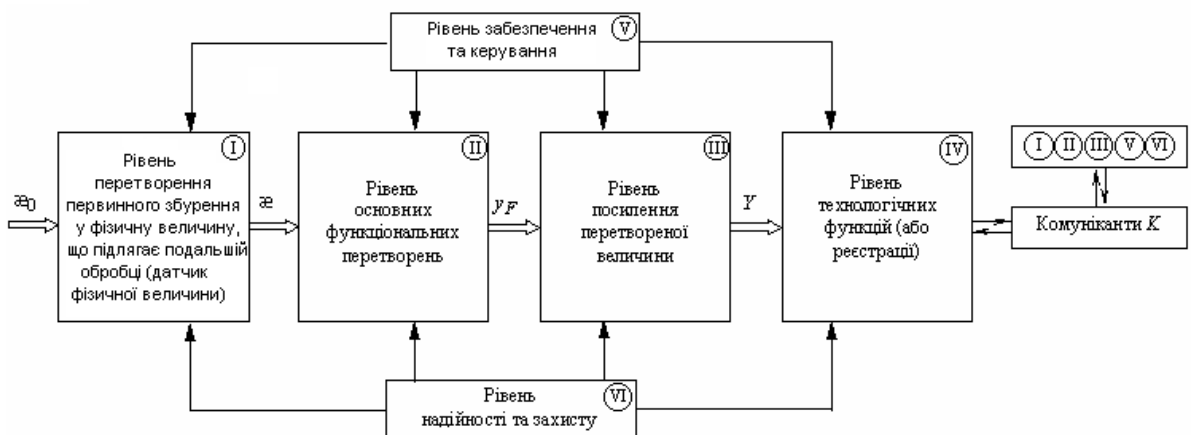
### 2.1. Функціональна структура приладів

В теорії конструкцій можлива багатозначність станів та зв'язків обмежується функціональними однозначними зв'язками, якими має володіти виріб, що і забезпечить визначений та впорядкований функціональний стан виробу.

Звідси: *функціональна структура виробу* – це сукупність структурних функціональних елементів окремого виробу та зв'язки поміж цими елементами, які забезпечують роботу виробу відповідно до призначення.

### 2.2. Рівнева модель функціональної структури

Функціональну структуру приладів і апаратів будемо розглядати у вигляді *рівневої моделі*, представленої на рис.2.1.



**Рис. 2.1. Рівнева модель функціональної структури приладів та апаратів:**

I – рівень перетворення: первинне фізичне поле ( або його збурення)  $x_0$  перетворюється у представницьку величину  $x$ , яка підлягає подальшій обробці –

**датчик фізичної величини;**

II – рівень основних функціональних перетворень,  $UF$  - функціональні перетворення сигналу;

III – рівень посилення перетвореної величини,  $Y$ ;

IV – рівень технологічних функцій (властивий апаратам);

V – рівень забезпечення (та керування);

VI – рівень надійності та захисту;

К – комуніканти; зв'язки з оточенням та внутрішні зв'язки з окремими рівнями

Тут виділено шість рівнів і окремо елементну базу  $K$ , що забезпечує функції комунікацій, яку об'єднали поняттям «комуніканти».

За даною схемою первинне фізичне поле  $x_0$  поступає на вхід датчика фізичної величини, у якому це поле перетворюється у представницьку величину  $x$ ; остання підлягає подальшим перетворенням.

*Послідовно, будується ланцюжок зв'язків поміж функціональними елементами, що в сукупності і забезпечує функціональну сутність приладу (апарата).*

Зазначимо, що основними рівнями є перші чотири, якими перетворюється вхідна величина, тоді як решту – це рівні забезпечення.

Рівневий принцип перетворень у вигляді наведеної схеми представляє загальну модель приладів (і апаратів); конкретика проявляється при розгляді окремих класифікаційних груп приладів, а саме: вимірювальні прилади, прилади-генератори та прилади-апарати (регульовально-керувальні). Суть конкретики така.

*Вимірювальні прилади.* У їх складі обов'язкова присутність  $I$ -го рівня – датчика фізичної величини, який перетворює первинне фізичне поле у представницьку величину. З наступних основних рівнів у переважних випадках наявні  $II$  та  $IV$  тоді як  $III$ -го може і не бути. Для цієї групи приладів на  $IV$  рівні здійснюється реєстрація вимірювальної величини.

*Прилади-генератори.* У їх складі відсутній  $I$ -ий рівень – датчик фізичної величини. Решту рівнів присутні.

*Прилади-апарати.* У цих системах присутні переважно всі рівні, хоча  $I$ -го може і не бути. Сигнал для керування виробляється не датчиком фізичної величини, а на рівні функціональних перетворень або системою керування. На  $IV$  рівні здійснюються технологічні перетворення – дії над матеріалом.

### **2.2.1.1-й рівень: перетворення первинного фізичного поля: датчики фізичних величин**

Традиційна функція приладів - перетворення первинного фізичного поля або його збурення в форму, яка доступна для сприйняття людиною як інформація про об'єкти зовнішнього світу. Здійснення такого перетворення здійснюється системою, яку називають *датчиком* ( $d.$ ) фізичної величини. Переважно, датчик фізичної величини незалежний від приладу і винесений за межі приладу. Якщо на вхід датчика поступає фізичне поле або його збурення, то на його виході, відповідно з метрологічною термінологією, формується так звана *представницька величина*. Найбільш сприйнятлива форма представницької величини – це елект-

рична, як така, що сучасна техніка навчена добре обробляти, перетворювати, зберігати.

Перетворення неелектричних величин в електричні може здійснюватися двома способами.

1) *Активним* перетворенням енергії одного виду в енергію іншого виду, в результаті чого виробляються електричні величини: напруга, струм, заряд.

2) *Пасивним* перетворенням величини, що вимагає допоміжної енергії:

а) на основі безпосереднього застосування фізичних закономірностей; зокрема, можуть бути використані залежності таких фізичних величин, як опір, провідність, магнітна і діелектрична проникливість, індуктивність, напруга, інтенсивність зарядів і випромінювань (полів);

б) шляхом механічних впливів; ці дії дозволяють змінювати такі величини, як опір, індуктивність, ємність;

в) методом компенсації: таким способом можна вимірювати силу струму; компенсацію можна здійснювати вручну або автоматично. Неелектричні фізичні величини можна також перетворювати в інші, не лише електричні величини.

### **2.2.2. 2-ий рівень: функціональні перетворення**

. Даний рівень є основним і забезпечує роботу приладу згідно призначення. Характеризується *функцією перетворення сигналу (ФПС)*.

Як зазначалось у *Частині 1* даного посібника, перетворення  $F$ , які здійснюються цим рівнем, записуються так:

$$Y = F(x, q_{sn}) \quad (2.1)$$

Тут:  $x$  – представницька величина на вході рівня функціональних перетворень приладу, а  $Y$  – його кінцева реакція;  $q_{s, n}$  – конструктивні параметри кожного  $s$  – елемента  $n$  – ланки ланцюга перетворення сигналу.

В загальному в приладах можливим є довільне сполучення ланок перетворення сигналу. Розрізняють три способи увімкнення ланок перетворення: а) послідовний, б) паралельний, в) з зворотнім зв'язком.

При послідовному сполученні кінцеву ФПС приладу можна одержати методом послідовних підстановок:

$$Y = F(x, q_{sn}) = f_n(y_{n-1}, q_{sn}) = f_n \{f_{n-1}, \dots, f_2 [f_1(x, q_{s1})]\}. \quad (2.2)$$

Тут:  $f_n$  – функція перетворення сигналу  $n$  – ланкою.

Ще один спосіб отримання ФПС – це метод передаточних функцій, відповідно до якого кінцеву ФПС отримують так:

$$Y = i x = \{i_1 \times i_2 \times \dots \times i_n\} \times x. \quad (2.3)$$

Тут  $i$  – повне передаточне відношення,  $i = \{i_1 \times i_2 \times \dots \times i_n\}$ ;

$i_n$  – передаточні відношення окремих ланок перетворення.

Зазначимо, що цей метод справедливий лише при *лінійних* перетвореннях та при незмінності  $i_n$  у допустимих межах зміни вхідної величини  $x$ .

### 2.2.3. 3-ий рівень: підсилення перетвореної величини

На вхід даного рівня поступає перетворена величина  $Y = F(x, q_{s,i})$ , яку за ознаками можна вважати сигналом. Рівень потужності даної величини має бути достатнім для сприйняття людиною, якщо це вимірювальний прилад, або ж для керування технологічними операціями чи для перетворення матеріалу (генератор, апарат). На разі відсутності належного рівня здійснюється підсилення перетвореної величини. Системи підсилення принципово різняться в залежності від фізичної природи названої величини.

### 2.2.4. 4-ий: рівень технологічних функцій

Рівень технологічних функцій наявний таким виробам:

- приладам-генераторам;
- апаратам (регульовально-керувальним системам).

Системи та елементна база цього рівня здійснюють вплив на матеріали з метою перетворення їх фізико-механічного або хімічного стану.

Наведемо декілька прикладів. Генератори фізичних полів: (прилади фізіотерапії) – антени-випромінювачі фізичних полів; фото(рентген) апарати; конструктивна система зчитування зображення.

### 2.2.5. 5-ий: рівень забезпечення та керування

#### 2.2.5.1. Забезпечення роботи приладів (апаратів)

Суть цих функцій така:

1. Забезпечення метрологічної єдності вимірювальних величин.
2. Забезпечення енергоживлення: блоки живлення, стабілізація електричних величин, перетворення частоти.
3. Забезпечення механічних переміщень: електродвигуни, мікро переміщення п'єзоелементами, вакуумні, пневматичні та гідравлічні системи переміщення.
4. Забезпечення внутрішньої орієнтації та позиціювання окремих елементів, складальних одиниць.
5. Забезпечення орієнтації та позиціювання приладу у просторі.

### 2.2.5.2. Керування роботою приладів (апаратів)

Розрізняють внутрішнє та зовнішнє керування.

*Внутрішнє керування.* Функція управління необхідна для реалізації процесу перетворення сигналу. Спеціальне системне розгалуження в каналі проходження інформації формує сигнал зворотного зв'язку, який і здійснює регулювання за наперед заданими законами. Здійснюється власною (внутрішньою) елементною базою технічної системи, яка підлягає аналізу.

*Зовнішнє керування.* Здійснюється системами телеметрії, переважно зовнішньою процесорною технікою. Розрізняють: 1) ручне керування; 2) слідкуюче керування; 3) програмне керування.

*Ручне керування.* Наявні два підходи в діях. 1) Вихідна величина  $A(x)$  пов'язаний з керуючою величиною  $W$  ступінчатою функцією  $A(x) = k f(w)$ ,  $k=1,2,3\dots$ . Такий принцип характерний для приладів, які використовують для реєстрації фізичних величини (вольтметри з подільниками, змінна система об'єктивів та окулярів і т.і.). 2) Неперервна зміна  $A(x) = f(W)$  здійснюється оператором вручну відповідно з картою технологічного процесу, вимірювання, генерації або керування.

*Слідкуюче керування.* Принцип слідкуючого управління – не дозволити виходу (викиду) основного параметра  $A(x)$  за наперед заданий рівень  $A_0(x)$  або за наперед встановлені межі від  $A_{нижн}(x)$  до  $A_{верх}(x)$ .

*Програмне керування* в приладах використовується тоді, коли функція перетворення настільки складна, що навіть окремі операції по перетворенню виконуються по індивідуальному закону. Для цього необхідна відповідна послідовність регулюючих величин  $W_i$ . У системах з програмованим керуванням із зворотними зв'язками реалізація функції перетворення залежить від змісту сигналу зворотного зв'язку, а операції цієї функції виконуються за визначеною програмою. В загальному, програмне управління використовує жорсткий або плаваючий зв'язок командних сигналів, які формуються тактовим генератором.

## 2.2.6. 6-ий: рівень надійності та захисту

### 2.2.6.1. Рівень надійності

Надійність технічного виробу являє собою властивість відповідати меті свого призначення, яка характеризує *якість* виконання виробом заданих функцій у визначеному часовому інтервалі при збереженні основних параметрів виробу у визначених межах, які відповідають заданим технічним умовам на виріб, при дотриманні умов експлуатації, технічного обслуговування, зберігання і транспортування.

Стан працездатності виробу. Впродовж терміну експлуатації виробу його параметри якості, а, отже, і надійності, будуть змінюватись. На рис. 2.2 а показана діаграма імовірності безвідмовної роботи, а на рис. 2.2 б - альтернативне поняття, - імовірність (частота) відказів технічної системи упродовж терміну експлуатації. На діаграмах виділені три стадії (цикли) ходу цих залежностей: *I* – стадія приробки; *II* – стадія прогнозованого терміну роботи, *III* – стадія деградації.. На початковій стадії (*I*) (приробка, обкатка) експлуатації виробу, перші ж увімкнення виявляють як приховані дефекти елементної бази, так і дефекти складання та налаштування виробу в цілому. Після приробки, впродовж якої деталі та вузли, які вийшли з ладу, замінюються на працездатні, а системні відмови, наприклад, внаслідок

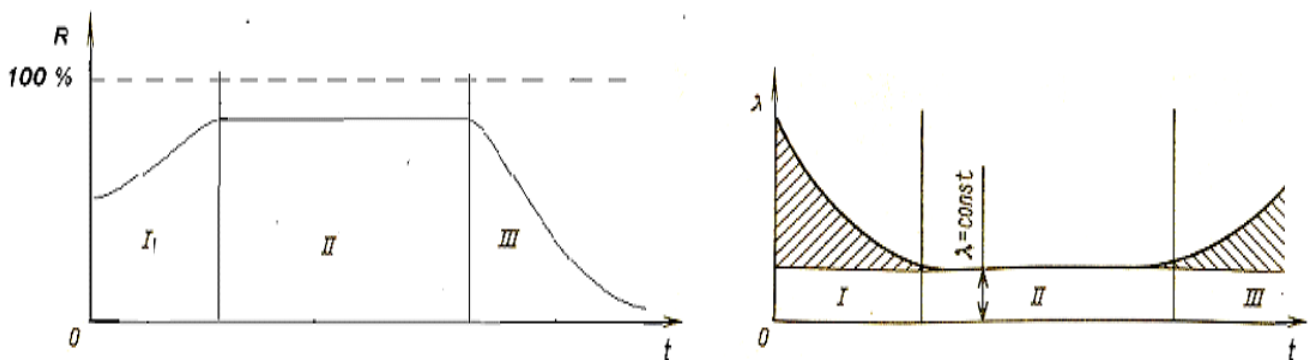


Рис. 2.2 а, б. Залежність імовірності безвідмовної роботи  $R$  (а) та частоти відказів  $\lambda$  (б) технічної системи від часу експлуатації  $t$ :

*I* – стадія приробки; *II* – стадія прогнозованого терміну роботи;  
*III* – стадія деградації

похибок у виборі параметрів або розмірів елементної бази, усуваються, робота виробу стабілізується, частота відказів зменшується і за-



лишається відносно незмінною упродовж всього планового терміну експлуатації.

Завершальна стадія експлуатації (*III*) – це період інтенсивної втрати ресурсу працездатності як окремих деталей, так і складальних вузлів в цілому, – період деградації функціональних властивостей виробу.

#### **2.2.6.2. Захист технічної системи та оточення**

З метою забезпечення надійності роботи технічної системи, оточення та персоналу від дії шкідливих факторів, які генеруються цією системою, її елементна база зокрема та сама система в цілому підлягає захисту на конструктивному та технологічному рівні. Отже, засобам захисту підлягають:

- елементна база технічної системи зокрема та система в цілому;
- захист персоналу від дії шкідливих факторів, які генеруються виробом;
- захист оточення від дії вище названих шкідливих факторів.

Перелік факторів впливу та заходів захисту:

1. Захист від кліматичних впливів в цілому та від вологи зокрема;
2. Захист персоналу від дій електрики;
3. Захист від теплових навантажень;
4. Захист від електромагнітних полів;
5. Захист від механічних навантажень;
6. Захист від шуму.

### **2.3. Захист технічних систем та оточення**

#### **2.3.1. Захист від кліматичних впливів в цілому та від вологи**

Кліматичні умови впливають на прилад при транспортуванні, зберіганні та експлуатації. До таких умов відносять: температуру, вологість, тиск повітря, сонячне випромінювання, вітер, дощ, росу, сніг, лід, промислові гази, що входять у склад повітря (наприклад NaCl, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> Cl), пісок, пил, різні промислові включення, інше. Сюди ж відносять також і біологічний фактор: бактерії, грибки (пліснява), взаємодію з комахами, гризунами і термітами. Назване вимагає цілеспрямованих конструктивних заходів щодо захисту обладнання відповідно до умов експлуатації; стандартизовані **класи вико-**

**нання та класи експлуатації.** Позначення класів включають кліматичний район застосування і категорію установки виробу.

*Класи експлуатації* указують в паспорті на виріб, характеризують граничні значення кліматичних навантажень, як-от: максимальна та мінімальна температура, відносна вологість повітря, вміст пилу, крапель води, забруднення повітря, пліснява, наявність механічних коливань, ударних навантажень.

### **2.3.2. Захист персоналу від дій електрики**

Захист від електричного удару для електронних приладів і пристроїв поділяють на захист від безпосереднього дотику при звичайній роботі та захист від побічного дотику у випадку помилки. Для названих приладів граничними з точки зору безпеки при дотику вважаються такі напруги:  $U_{\geq} \geq 65 \text{ V}$  і  $\tilde{U} \geq 42 \text{ V}$ .

Розрізняють *три класи* захисту:

клас захисту I – захисне заземлення; клас захисту II – захисна ізоляція;  
клас захисту III – захисна понижена напруга.

### **2.3.3. Захист приладів від теплових навантажень**

Однією з важливих конструкторських задач в приладобудуванні є захист приладу в цілому та його елементної бази від теплових дій, природа яких двояка: 1) зовнішнє оточення приладів; 2) власні теплові поля.

Природа зовнішніх теплових полів: кліматичний фактор, низькотемпературні умови стратосфери та космосу, робота приладів у підземних шахтах, гарячих виробничих цехах. Природа внутрішніх полів: внаслідок споживання електричної енергії та обмеженого значення коефіцієнта корисної дії активні елементи приладу нагріваються, формуючи нагріті зони у замкнутому об'ємі, сформованого корпусом приладу. Відповідно до принципів термодинаміки, тепло від нагрітої зони поширюється у менш нагріту. Строгий розв'язок задачі переносу тепла від нагрітої зони приладу базується на диференціальних рівняннях і практично неможливий. Завдяки зусиллям учених-математиків Лапласа, Пуассона та Фур'є задача переносу тепла була спрощена внаслідок формулювання 4-х граничних умов, суть яких така.

Гранична умова першого роду – це встановлення математичного вигляду температурного розподілу у замкнутому об'ємі корпусу у вигляді  $\theta(t) = f(x, y, z, t)$ . Суть трьох наступних умов – це виявлення фізичних явищ, відповідальних за перенос тепла, а саме:

1. Теплопровідність -  $\Phi_L$ ;

2. Теплове випромінювання -  $\Phi_S$ ;

3. Конвекція -  $\Phi_K$ .

Тут:  $\Phi$  - тепловий потік,  $\Phi = dQ/dt$ ,  $Q$  - кількість тепла,  $t$  - час.

Для описання всіх трьох процесів переносу тепла використовується очевидне феноменологічне рівняння

$$\Phi = \alpha A \Delta \theta \text{ [w]}, \quad (2.3)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт теплообміну,  $[w/(m^2 \cdot K)]$ ;  $\{\alpha_L, \alpha_S, \alpha_K\}$  - відповідно коефіцієнти теплопровідності, випромінювання та конвекції;  $A$  - площа поверхні теплообміну,  $[m^2]$ ;  $\Delta \theta$  - перепад температури між двома ізотермічними поверхнями в тілі або між двома тілами.

Строгий розрахунок теплового обміну поміж тілами складної форми неможливий, тоді як для тіл правильної форми проведені розв'язки, з яким можна ознайомитись у спеціальній літературі.

Спрощений підхід у розв'язках теплового балансу базується на тепловій моделі приладу, зображеного на рис. 2.3.

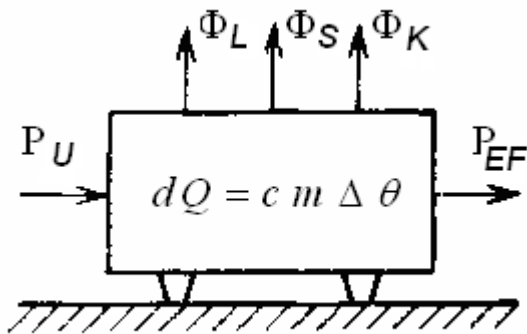


Рис. 2.3. Модель теплового балансу приладу

Прилад зображений у вигляді прямокутника, під яким розуміємо його корпус. Споживана енергія живлення  $P_U$  витрачається на корисну складову  $P_{EF}$ , далі - на нагрівання елементної бази приладу масою  $m$  та теплоємності  $c$ , до рівня  $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$  (кількість тепла  $dQ$ ), який відповідає тепловому режиму роботи приладу.

Робота приладу супроводжується виділенням теплових потоків  $\Phi_L$ ,  $\Phi_S$ ,  $\Phi_K$  - відповідно через тепловий контакт (теплопровідність), оптичне випромінювання та конвекцію. Отже, рівняння теплового балансу запишеться наступним чином:

$$P_U = \Phi_L + \Phi_S + \Phi_K + dQ/dt + P_{EF}. \quad (2.4)$$

Для встановлення функціонального режиму приладу необхідний деякий час з моменту увімкнення, упродовж якого відбувається так званий прогрів елементної бази з подальшою стабілізацією її температури. Кажуть, встановлюється тепловий режим приладу, в подальшому споживане тепло не витрачається на пода-

льший нагрів елементної бази приладу. Але разом з цим, так як елементна база вже прогріта, то цей прогрів залишається незмінним впродовж всієї подальшої роботи приладу, тобто  $dQ/dt=0$ .

Отже, встановлюється тепловий баланс, який математично описується так:

$$P_U - P_{EF} = \Phi_L + \Phi_S + \Phi_K. \quad (2.5)$$

Інакше,

$$\Phi_Q = \Phi_L + \Phi_S + \Phi_K. \quad (2.6)$$

Тут  $Q=cm(\theta_2 - \theta_1)$  - це кількість тепла, необхідна для нагріву елементної бази приладу і корпусу при усталеному тепловому режимі приладу, що тотожній поняттю «усталений функціональний режим»;  $\theta_1$  - температура оточення (початкова температура, температура до увімкнення),  $\theta_2$  - температура прогрітого приладу в усталеному режимі його роботи.

Співвідношення (2.6) лежить в основі спрощених розрахунків теплового балансу приладів.

#### **2.3.4. Захист від електромагнітних полів**

На роботу радіо – електронних систем (РЕС) проявляється негативний вплив електромагнітних полів як природного так і штучного походження. В такому плані ці поля розглядають як завади (рос. *помехи*) в роботі цих систем.

За основним параметром дії названих полів класифікують електричні, електромагнітні, магнітні поля. За характером зміни в часі цих параметрів, а, отже, і наслідками дії - на статичні та динамічні. Результатом дії статичних полів є наведення зарядів на металевих частинах, які формують наведений потенціал. Динамічні поля породжують вихрові струми у замкнутих контурах, що особливо небезпечно для апаратури змінних сигналів.

Отже, порушення функціонування апаратури під впливом е/м полів виникає внаслідок наведення в замкнутих ланцюгах електронної мережі приладу напружень та струмів, що приводить до: 1) виділення на деяких елементах великої кількості тепла, що спричиняє вихід з ладу цих елементів (електричний пробій); 2) наведення додаткового потенціалу на відповідних елементах, що порушує їх функціональні електричні умови з наступним викидом параметрів за допустимий рівень. Справедливе також твердження про утворення міжкаскадних зв'язків під впливом електростатичних та електромагнітних полів.

Наступна класифікація полів властива динамічним процесам і будується на глибині проникнення  $\epsilon/m$  випромінювання в матеріал: це низькочастотні, високочастотні та надвисокочастотні  $\epsilon/m$  - коливання, а також електромагнітні вихрові збурення з широким спектром частоти.

Природа  $\epsilon/m$  – полів: 1) атмосферні явища: сонячні бурі, грім, блискавка ; 2) радіо передаюча апаратура, локатори; 3) лінії електропередач, електротранспорт; 4) робота електричних машин, електрозварювальні технології.

Канали впливу на електронну апаратуру: 1) через мережу живлення; 2) через повітряний простір.

Розроблений комплекс дій (заходів) на зменшення впливів, які поділяють на: *методичні* та *технічні*.

**Методичні:** схемотехнічні та конструкторські.

До *схемотехнічних* відносять:

- 1) використання коротких схемотехнічних ліній та елементів гальванічної розв'язки;
- 2) застосування *LC*-фільтрів у мережі живлення;
- 3) використання амплітудного та часового стробування;
- 4) використання цифрових методів обробки сигналів.

*Конструкторські* заходи:

- 1) групування конструктивних заводозалежних елементів у вузли з наступним індивідуальним екрануванням (навіть окремих плат), особливо на вході схемотехнічної одиниці;
- 2) ослаблення паразитних зв'язків шляхом рознесення джерел та приймачів завод та їх екранування, ортогонального розташування провідників у сусідніх шарах друкованих плат, зменшення довжини взаємо дотичних ділянок ліній, використання матеріалів з малою діелектричною проникливістю;
- 3) вибір точок заземлення за раціональним принципом та збільшення їх кількості;
- 4) зменшення розмірів контактних з'єднань, наприклад заміною роз'ємних на нероз'ємні, включно еластомірні.

*Технологічні* заходи:

- 1) зменшення розкиду параметрів елементів схеми та окремих провідних ліній завдяки виготовленню їх в одному технологічному циклі (до прикладу, *коаксіальний кабель*);

2) освоєння виробництва виробів з поліпшеними експлуатаційними властивостями, перехід від індивідуального виготовлення окремих елементів до інтегрального модульного.

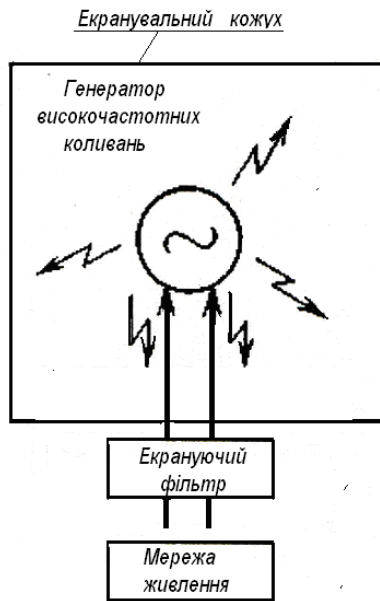
**Технічні** заходи захисту апаратури від е/м впливів – це екранування полів, використання екрануючих фільтрів та протизавадових конденсаторів.

Суть екранування – розташування електронного приладу у просторово замкнутий кожух, виготовлений з матеріалу, який внаслідок поглинання блокує поширення випромінювання в зону розташування елементної бази з одного боку, а з іншого – утворює замкнутий електричний контур, який електричне з'єднаний із заземленням таким чином, що індуковані на провідному корпусі заряди стікають у Землю. Для цілковитого розуміння питання екранування уявимо собі деякий високочастотний генератор, що живиться від джерела постійного чи змінного струму. Очевидно, що цей генератор буде випромінювати у простір електромагнітні хвилі (рис.2.4), які будуть джерелом завад для роботи іншого електронного обладнання. При цьому джерелом випромінювання будуть як окремі деталі самого генератора, так і мережа живлення. Для належного екранування недостатньо розмістити генератор у екрануючий кожух, необхідно також поставити перепону у мережу живлення приладу.

Таким чином, під екраном будемо розуміти як названий кожух, так і перепону у мережі живлення, яку називають екрануючим фільтром.

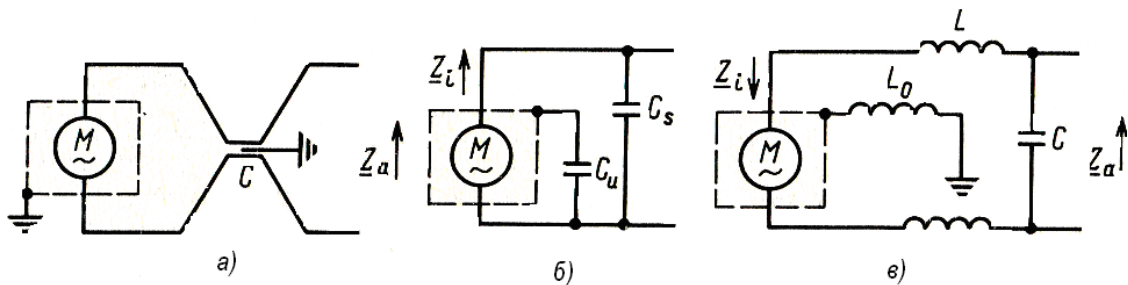
При поширенні поля потрапивши на перепону, частина його енергії відіб'ється від першої поверхні екрану, частина проникне в матеріал виготовлення і продовжить поширення, зазнаючи при цьому поглинання, до зустрічі з наступною поверхнею, від якої знову ж частково відіб'ється і вийде назовні, тобто наскрізь.

Досягнуте при цьому ослаблення поля називається екрануючою дією, відношення напруженості полів за екраном та перед ним – ефективність екранування, а виражений в децибелах логарифм величини, обернений до цього коефіцієнта, – затуханням екранування.



**Рис. 2.4. Екранування генератора високочастотних коливань**

**Екрануючі фільтри** пригнічення завад, створюваних електродвигунами, подані на рис. 2.5.



**Рис. 2.5. Фільтри пригнічення завад, згенерованих електродвигунами:**

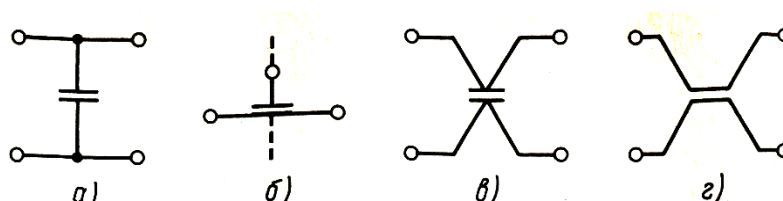
- а – двигун, клас захисту I,  $C = 0,05 - 1$  мкФ;
- б – двигун, клас захисту II,  $C = 0,05 - 1$  мкФ;
- в – двигун з малим внутрішнім опором,  $L = 0,1 - 10$  мГн

До затискачів двигуна із заземленим корпусом (клас захисту I) можна приєднати здвоєний конденсатор  $C$  з заземленою середньою точкою (рис. 2.5, а). Інший варіант завадозахисту показаний на рис.2.5, б. Тут паралельно затискачам двигуна з захистом класу II приєднаний конденсатор  $C_s$ , який пригнічує симетричну складову завад, тоді як для приглушення несиметричної складової слугує конденсатор  $C_u$ , який приєднується до одного із затискачів та корпусом двигуна. Виходячи з того що він приєднується до корпусу, на якість цього конденсатора накладаються особливо високі вимоги з умов безпеки експлуатації. У схемі рис. 2.5, в використана більшої ефективності комбінована схема приглушення

завад – за поздовжньою (дросьель  $L$ ) та поперечною схемою (конденсатор  $C$ ). Дросель  $L_D$  встановлюють при значних несиметричних складових завад.

На рис. 2.6 показані *стандартні електричні схеми проти завадових конденсаторів*, які повсякчасно використовуються у всіх побутових приладах і апаратах. Їх завданням є пригнічення завад, які поширюються від джерела всередині приладу по проводам живлення у мережу. Основною вимогою до таких конденсаторів є незначний прохідний повний опір при високих частотах та низька індуктивність. Але разом з цим кожна із показаних схем має свої особливості. Низько індуктивний нормальний конденсатор (рис.2.6, а) ефективний до частот порядку 10-ти МГц. Прохідний конденсатор (рис. 2.6, б) ефективний включно до самих високих частот, робочий струм протікає через його середній провідник, що не спричиняє обмежень застосувань по струму.

Шунтувальний конденсатор (рис.2.6, в) являє собою симетричний чотириполюсник з пониженою індуктивністю виводів, що забезпечує йому



**Рис. 2.6. Протизавадові конденсатори:**  
 а – низько індуктивний нормальний; б – прохідний;  
 в – шунтувальний; г – прохідний шунтувальний

функціонування як у УКХ, так і НДЧ діапазонах. Конденсатор (рис. 2.6, з) відноситься до класу прохідних шунтувальних.

### 2.3.5. Захист технічних систем (ТС) від механічних впливів

Під механічними навантаженнями на прилад розуміють *коливання, вібрації та удари звукових, ультра- та інфра- звукових частот*, які внаслідок дії порушують стійкість елементної бази, її монтаж та працездатність виробу.

Метою заходів захисту від механічних навантажень є:

*забезпечення виконання приладом, що підлягає цим навантаження, функціональних дій, підвищення точності та надійності виконання дій;*

*продовження терміну служби приладів; захист обслуги від шуму та вібрацій.*



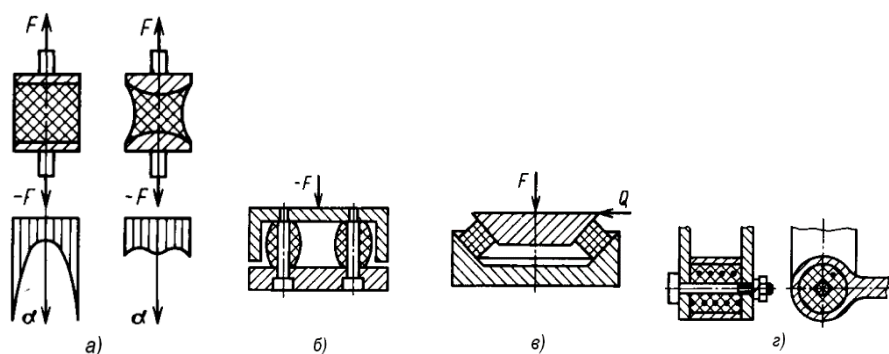
Причинами механічних впливів є таке. *Зовнішні*: вібрації, які проявляються внаслідок коливань фундаментів, причинами яких є *промислові фактори* (робота штампувальних молотів та великотоннажних пресів, потужних верстатів, вібраційних столів), *вібрації* транспортних засобів внаслідок нерівності дорожнього полотна, *поштовхи* залізничних составів при маневруваннях, *атмосферні* причини (грім, блискавка, коливання ґрунтів). *Внутрішні*, викликані рухом механічних систем: рух поршнів в двигунах внутрішнього згорання, незбалансованістю обертових деталей, робота механізмів поблизу резонансних частот, шпарини у спряженнях рухомих з нерухомими деталями. Збуджуючими величинами вібрацій є переміщення, швидкість, прискорення, сила при *поступальному* русі; обертання, кутова швидкість, кутове прискорення або обертальний момент при *обертovому* русі. Зазначимо, що розроблена велика множина датчиків та випробувальних стендів, призначених для досліджень цих механічних впливів, а також регулювання та налаштування механізмів на мінімальні параметри вібраційних коливань.

Прилад або верстат має бути підвішений або встановлений на віброізоляторах. Вважається, що ізоляція коливань буде ефективною, якщо власні частоти системи захисту менше найнижчої гармоніки частоти збудження; по можливості має дотримуватись співвідношення  $f_{із} < 0,5 f_{зб}$ .

В якості віброізоляторів використовують: сталеві пружини в опорах приладів або машин з низькими частотами обертання; гумові подушки (так звані еластоелементи) в опорах приладів і машин з частотами обертання від середніх до високих. Пружні і демпферні проміжні елементи, які встановлюють як прокладки поміж системою та її базовим елементом і станиною екранування. Знаходять застосування пластини з гуми, пробкового дерева, повстяні (рос. войлок), пластмаси та металопластмаси, інший багатошаровий листовий матеріал, пісок, інше.

Приклади віброізоляторів показані на рис. 2.7. Для виконання своїх функцій впродовж тривалого терміну служби їх конструкція має відповідати певним вимогам. Циліндричні гумові віброізолятори (рис. 2.7, а), що працюють на розтяг, завдяки циліндричній формі при відповідній деформації можуть витримують високі механічні напруження. З двох наведених конструкцій варіант справа більш оптимальний щодо поперечного розподілу напруження, як це показано на епюрах внизу конструкцій. Якщо порожнистий віброізолятор з циліндричної гуми (рис. 2.7, б) навантажується на стиск в напрямку осі циліндра, то тіло гуми значно розширюється в поперечному напрямку. Ця деформація має бути віль-

ною, деталі не повинні дотикатись до стінок або взаємно, що ураховується при конструюванні ізолятора. Кільцевий гумовий віброізолятор (рис. 2.7, в)



**Рис. 2.7. Конструкції гумових віброізоляторів:**

а) – варіанти циліндричних, що працюють на розтяг (внизу – поперечний розподіл напружень розтягу у гумі); б) порожнинний, працює на стиск; в) кільцевий, працює на стиск, зсув, кручення; г) з гвинтовою пружиною, сприятливий до динамічних та ударних навантажень

призначений для передачі сил стиснення, зсуву, а також крутного моменту при одночасному демпфуванні коливань.

Для передачі крутного моменту еластичний елемент такого віброізолятора має бути зчеплений вулканізацією (спіканням) з ведучим і веденим дисками з урахуванням дотичних реактивних напружень, що розвиваються при навантаженнях. При одночасній дії ударних і стискаючих навантажень в гуму амортизатора може бути встановлена спіральна гвинтова пружина для підвищення межі міцності на стиск (рис. 2.7, г).

Існує велика множина конструктивних рішень циліндричних і плоских гумових віброізоляторів, призначених для амортизації механічно залежних технічних систем; їх ефективність оцінюється за відомою філософською істиною:

**«Практика критерій істини».**

# Лабораторна робота № 11

## Дослідження функціональної структури вакуумметра ВИТ-2

### МЕТА РОБОТИ:

*набуття практичних навиків аналізу функціональної структури приладів на прикладі вакуумметра ВИТ-2*

### ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ

1. Конспект з основ «Функціональна структура приладів», яка подається у Аналітичній частині; має бути представлена графічно **рівнева модель функціональної структури** та короткий зміст кожного з рівнів перетворення сигналів.
2. За зовнішніми ознаками встановити належність приладу до відповідної функціональної групи, а саме:
  - вимірювальні;
  - прилади-генератори;
  - прилади-апарати (керування технологічними процесами).Вибір обґрунтувати та аргументувати.
3. Скласти та описати рівневу модель функціональної структури вакуумметра, використовуючи функціональну блок-схему приладу та його принципову електричну схему.
4. За зовнішнім виглядом приладу класифікувати конструктивні елементи за призначенням відповідно до діаграми Вена, а саме: - технічна, естетична, ергономічна функції. Дані занести у таблицю. Ергономічні та естетичні елементи описати якісно. Комуниканти класифікувати за призначенням (Функціональні зв'язки, homos, texne – комунікації).
5. Освоїти правила експлуатації та методику проведення вимірювань термомпарною частиною вакуумметра (низький вакуум).
6. Освоїти правила експлуатації та методику проведення вимірювань іонізаційною частиною вакуумметра (високий вакуум).

Обладнання , пристосування, матеріали

Вакуумметр ВИТ-2, манометричні перетворювачі, шнури з'єднань

## МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Отримати допуск до виконання роботи; необхідна умова допуску - наявність заготовки протоколу виконання роботи, у якій висвітлюється:
  - назва, мета, завдання до роботи;
  - короткий конспект відповідно до завдання №1.
2. Провести аналітичну роботу відповідно до рубрик Завдання.
3. Скласти допуск на знання фізичних принципів роботи манометричних датчиків та їх експлуатаційних характеристик.
4. Скласти допуск проведення вимірювань вакууму, попередньо описавши маніпуляції з органами керування процесом вимірювання. Методику вимірювань освоїти відповідно до інструкції з експлуатації приладу.
5. Провести вимірювання:
  - а) термopарною частиною вакуумметра;
  - б) іонізаційною частиною вакуумметра.Дані занести у протокол виконання роботи.
6. Зробити загальні висновки виконання роботи.

## Протокол звіту містить:

1. Завдання до роботи.
2. Конспект матеріалу «Функціональні перетворення в приладах».
3. Протокол виконання роботи відповідно до Завдання та Методики.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як класифікують прилади за технічними ознаками?
2. Що означає «Рівнева модель перетворення сигналу»?
3. Які рівні відносять до основних, а які до допоміжних?
4. Чи відрізняються «Рівневі моделі перетворення сигналу» для приладів з різними класифікаційними ознаками? Якщо так, то яким чином?
5. Що включає в себе діаграма Вена?
6. Перелічити фактори, за якими класифікують системи захисту. Яка їх кількість?
7. До якої класифікаційної групи необхідно віднести вакуумметр і чому?
8. Які рівні перетворення сигналу наявні у функціональній структурі термомпарної частини вакуумметра?
9. Які рівні перетворення сигналу наявні у функціональній структурі іонізаційної частини вакуумметра?
10. Яке фізичне поле поступає на вхід датчиків фізичної величини?
11. Які фізичні процеси використані для проведення вимірювань низького та високого вакууму?
12. Пов'язати фізичні принципи роботи манометричного *термопарного* перетворювача з маніпуляціями з органами керування процесом вимірювання.
13. Пов'язати фізичні принципи роботи *іонізаційного* термопарного перетворювача з маніпуляціями з органами керування процесом вимірювання.
14. Які застереження щодо техніки безпеки при роботі з:
  - термопарним перетворювачем?
  - іонізаційним перетворювачем?

## Інструкція з експлуатації ВИТ-2

### 1. Технічне описання

#### 1.1. Призначення та застосування

*Вакуумметр іонізаційно-термопарний* ВИТ-2 призначений для вимірювання тиску сухого повітря (сухих газів) в діапазоні  $2 \cdot 10^{-1} \div 10^{-7}$  тор (мм.рт.ст.).

Вакуумметр є комплекс технічних виробів, який складається з вимірювального приладу та електрично приєднаних манометричних перетворювачів (датчиків), які безпосередньо сполучаються з вакуумним об'ємом: перетворювача манометричного *термопарного* ПМТ-2 (скляна колба) або ПМТ-4М (металевий корпус) (низький вакуум), та перетворювача манометричного *іонізаційного* ПМИ-2 (високий вакуум).

Прилад призначений для використання в лабораторних та заводських умовах.

#### 1.2. Технічні характеристики

##### **Низький вакуум:**

1.2.1. Тиск від  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $10^{-3}$  тор вимірюється перетворювачем манометричним *термопарним* ПМТ-2 або ПМТ-4М – *термопарна частина* вакуумметра.

1.2.2. Струм нагрівника термопарного перетворювача регулюється в межах від 95 до 150 ма.

1.2.3. Шкала вимірювального приладу термопарної частини вакуумметра проградуєвана в мілівольтах, а тиск в системі визначається за кривою градування, яка додається до випускного атестата (паспорта) на кожен перетворювач (манометрична лампа).

1.2.4. З метрологічної точки зору термопарна частина вакуумметра є індикаторна. Відносна похибка вимірювання тиску складає  $\pm 60$  % в діапазоні  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $10^{-3}$  тор для перетворювача ПМТ-2.

##### **Високий вакуум:**

1.2.5. Тиск від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-7}$  тор вимірюється перетворювачем манометричним *іонізаційним* ПМИ-2 (скляна колба) – *іонізаційна частина* вакуумметра.

1.2.6. Шкала вихідного приладу іонізаційної частини вакуумметра градуєвана в одиницях струму – мікроамперах (мка). Діапазон вимірювальних струмів, а отже, і діапазон вимірюваних тисків, розбитий на 5 піддіапазонів (див. табл.1).

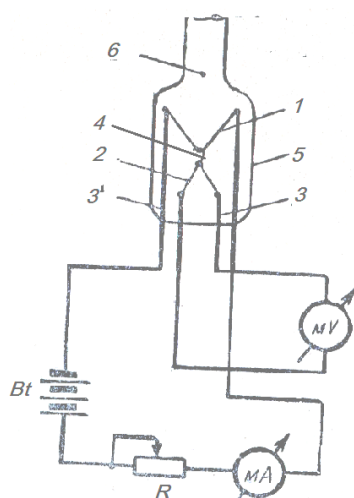
Таблиця 1 -Градування вимірювальних діапазонів

Піддіапазон	Множник шкали	Діапазон вимірюваних струмів, $a$	Тиск, $tor$
I	1	$10^{-5} \div 10^{-4}$	$10^{-3} \div 10^{-2}$
II	$10^{-1}$	$10^{-6} \div 10^{-5}$	$10^{-4} \div 10^{-3}$
III	$10^{-2}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$	$10^{-5} \div 10^{-4}$
IV	$10^{-3}$	$10^{-8} \div 10^{-7}$	$10^{-6} \div 10^{-5}$
V	$10^{-4}$	$10^{-9} \div 10^{-8}$	$10^{-7} \div 10^{-6}$

## 2. Принцип дії

### 2.1. Термопарна частина вакуумметра (низький вакуум)

Термопарною частиною вакуумметра проводиться вимірювання в межах від  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $10^{-3} \text{ тор}$ . Конструкція термопарного перетворювача показана на рис.2.



**Рис.2. Конструкція перетворювача манометричного термопарного (тип ПМТ) та спрощена схема вимірювальної системи**

1 - спіраль нагрівника; 2 - термопара; 3,3' - конструкційні штирі; 4 - теплопровідна металева перемичка; 5 - колба (балон); 6 - трубчастий відросток;  $mA$  - міліамперметр;  $mV$  - мілівольтметр;  $R$  - реостат;  $Bt$  - батарея

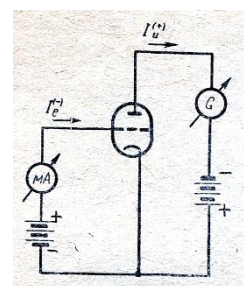
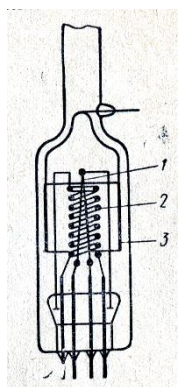
Електрорушійна сила, що генерується термопарою 4, розвивається температурою спаю термопари, яка в свою чергу буде залежати від температури нагрівника 3. Нагрівник та термопара нероз'ємне з'єднані заварюванням через перемичку  $П.$ , яка забезпечує належний тепловий контакт нагрівника та термопари. Температура нагрівника залежить від сили струму, що проходить через нього. Регулювання нагріву здійснюється реостатом 5.

При стабільному проходженні струму через спіраль нагрівника тепловий режим, що забезпечує нагрів спаю термопари, встановлюється трьома фізичними процесами: 1) теплопровідністю перемички П, 2) охолодженням перемички та спаю термопари молекулами газу, що оточують ці елементи, 3) теплове випромінювання нагрітих зон. Якщо систему відкачувати на високий вакуум, тобто понижувати тиск у системі, то буде зменшуватись кількість молекул газу оточення. Тоді температура нагрівника буде збільшуватись внаслідок зменшення тепловідводу молекулами газу оточення, збільшиться температура як перемички, так і спаю термопари, внаслідок чого зросте термоелектрорушійна сила (ТЕРС) термопари.

За відомою залежністю ТЕРС від тиску (див. рис. 3), визначається ступінь вакууму (тиск) у системі (додається до паспорта ПМТ).

## 2.2. Вакуумметр іонізаційний (високий вакуум)

Вимірювальні межі тиску цієї частини вакуумметра складають від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-7}$  тор. Датчиком тиску газу (повітря) служить іонізаційно манометричний перетворювач ПМИ-2. Принцип його дії полягає у вимірюванні іонного струму, що утворюється внаслідок іонізації залишкового газу у вакуумному об'ємі, який підлягає дослідженню. Іонізація викликається потоком електронів, що випускаються розжареним катодом (термоемісія електронів).



**Рис. 3. а – конструкція перетворювача манометричного іонізаційного ПМИ:**

1 – спіраль емісії електронів (катод); 2 - сітка (струм емісії), 3 – колектор іонів залишкового газу у вакуумі (анод);

**б - схема вимірювання ПМИ:** G – гальванометр для вимірювання іонного струму, mA – міліамперметр для вимірювання струму емісії електронів

Іонний струм, що є результатом іонізації, дуже малий  $\{10^{-4} \div 10^{-9} \text{ A}\}$  і безпосередньо не може бути заміряний; тому у вакуумметрі використовується елек-



тронетричний підсилювач постійного струму з 100%-им зворотним зв'язком; підсилений струм вимірюється на виході стрілочним мікроамперметром. Іонізаційний перетворювач ПМИ-2 по суті є радіолампю – тріодом, анод якого виконаний у вигляді сітки, а колектор іонів має форму суцільного циліндра (див. рис. 3). На колектор подається від'ємний потенціал стосовно катода, що дорівнює – 50 V, а на анод – додатній, який дорівнює +200 V.

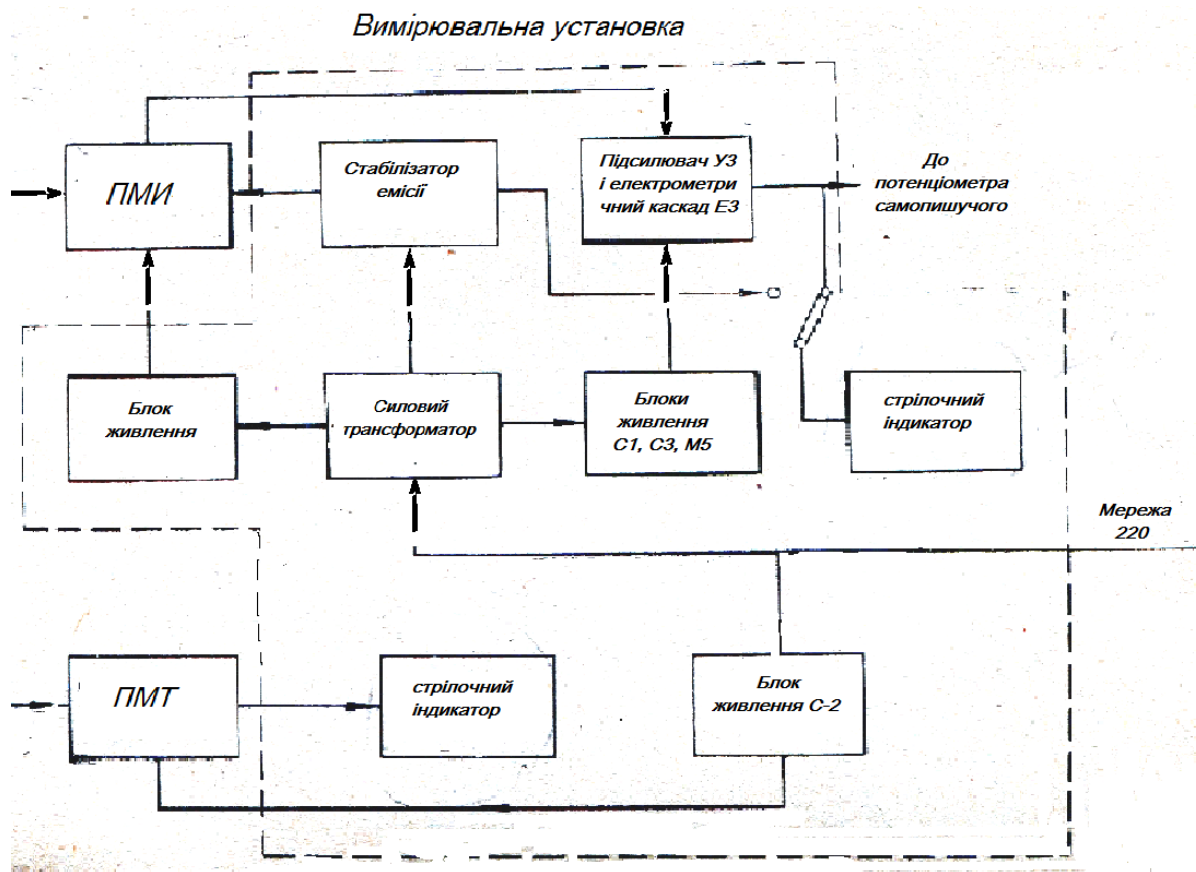
За допомогою стабілізатора струм емісії катода іонізаційного перетворювача підтримується постійним, що дорівнює 0,5 A. При постійному струмі емісії катода та постійній напрузі на аноді іонізаційного перетворювача, що прискорює рух електронів, утворене число іонів буде пропорційне молекулярній концентрації газу в помірній електродному просторі. Утворені позитивні іони збираються на колекторі перетворювача, оскільки він знаходиться під від'ємним потенціалом як анода, так і катода. Далі струм колектору подається на вхід підсилювача постійного струму, підсилюється до належного рівня і вимірюється стрілочним мікроамперметром.

### **2.3. Блок-схема вакуумметра**

Блок-схема приладу подається на рис.4. Бачимо, що вакуумметр складається з датчиків вакууму I, II (манометричні перетворювачі) та вимірювального Датчики вакууму за допомогою скляних трубок 1, 2 безпосередньо під'єднані до вакуумного об'єму. Лінії, що сполучають датчики з іншими структурними елементами блок-схеми а також сполучення цих елементів поміж собою, це приєднувальні провідники або кабелі (кабель – сукупність окремих провідників в одній захисній оболонці).

*Термопарна частина вакуумметра* забезпечує прямі вимірювання термоЕРС і струму нагрівника термопар. Блок-схема складається з параметричного стабілізованого джерела живлення С-2, який живиться силовим трансформатором, і стрілочним електричним індикатором (мілівольтміліамперметром).

*Іонізаційна частина вакуумметра* забезпечує вимірювання іонного струму і струму емісії електронів. Блок-схема включає таке: силовий трансформатор, блоки живлення С-1, С-3, С-5, М-5, стабілізатор емісії СТ-2, підсилювач У-3 та електронетричний каскад Э-3. Його вихід електрично узгоджений зі входом самописця.



**Рис.4. Функціональна схема (блок-схема) вимірювальної установки ВІТ-2**

### 3. Інструкція з експлуатації

#### 3.1. Термопарна частина вакуумметра (низький вакуум)

*Користування цією частиною проводиться у два етапи:*

- встановлення робочого струму нагріву термопарі нового ПМТ-2, який ще не був у експлуатації, або ж коригування цього струму на разі тривалого часу експлуатації перетворювача;
- робочі вимірювання низького вакууму.

***Вимірювання робочого струму нагріву перетворювача ПМТ-2***

1. Сполучити кабелем перетворювач ПМТ-2 з вимірювальним блоком.
2. Тумблер «Сеть 220 V» термопарної частини приладу встановити за напрямом стрілки; при цьому має засвітитись сигнальна лампочка.
3. Визначити робочий струм викачаного (вакуум  $\sim 10^{-5}$  мм.рт.ст.) на заводі перетворювача, відпаяного та неушкодженого\*.

Для цього встановити перемикач «Вимірювання – Струм нагріву» в положення «Вимірювання». Далі, використовуючи рукоятку відповідного реостата, вивести стрілку мілівольтметра на правий край шкали, що

відповідає значенню «10 *mv*».

*Вважати на ту обставину, що теплові процеси досить інерційні, тому ця процедура потребує ретельності та неквапливості.*

Струм нагріву визначають за нижньою шкалою цього ж індикатора, перемкнувши перемикач в положення «*струм нагріву*».

За технічними умовами струм нагріву годного ПМТ-2 має знаходитись у межах {100÷140} *mA*.

4. При тривалій експлуатації величина струму нагріву термопари зростає, тому підлягає повторному встановленню. Для цього під'єднаний до вакуумного об'єму перетворювач відкачують на високий вакуум (вакуум  $>10^{-4}$  *мм.рт.ст.*), і здійснюють процедури, указані у п.3, встановлюючи при цьому нове значення струму нагрівника термопари.

**\*При втраті вакууму внутрішнє покриття (геттерне) хвостовика скляного балона ПМТ-2 побіліє.**

### ***Робочі вимірювання низького вакууму***

1. Термопарний перетворювач вакуумно-щільно під'єднати до вакуумного об'єму, тиск у якому підлягає вимірюванню.
2. За допомогою спеціального кабелю та спеціальних роз'ємів електрично підключити вимірювальний блок (установку) до манометричного перетворювача.
3. Тумблер «Сеть 220» термопарної частини вакуумметра перевести за напрямом стрілки (на лицевій панелі); при цьому має загорітися сигнальна лампа.
4. Тумблер «Вимірювання – Струм нагріву» перевести в положення «*Струм нагріву*»; по нижній шкалі встановити робочий струм нагрівника, який указується на бічній циліндричній поверхні перетворювача.
5. Встановити перемикач «Вимірювання – Струм нагріву» в положення «*Вимірювання*»; здійснити відлік по верхній шкалі приладу (100 поділок відповідає 10-ти *mv*). Отримане значення у *mv* перевести у одиниці тиску (*мм рт. ст. або тор*), використовуючи градувальну криву, яка додана до інструкції з даної лабораторної роботи.

### 3.2. Іонізаційна частина вакуумметра (високий вакуум)

Вимірювання тиску іонізаційним перетворювачем проводиться за нижче наведеною методикою.

1. З'єднати належним кабелем іонізаційний перетворювач з вимірювальною установкою.
2. Послідовно установити тумблера «Сеть 220 V » і «Накал» у положення, указане стрілками (включено). При цьому має засвітитись сигнальна лампа.
3. Реостатом «Установка емісії» за шкалою стрілочного приладу (справа) встановити струм емісії катода  $0,5 \text{ ма}$  - (середина шкали – 50 проділок).
4. Через 5- 10 хвилин перемикач «Рід роботи» встановити в положення «Вимірювання» і ручкою «Установка нуля» встановити стрілку приладу на нуль.
5. Установити перемикач «Рід роботи» в положення «Прогрів». Підігрівати анод іонізаційного перетворювача впродовж 10 – 15 хв.
6. Встановити перемикач «Рід роботи» в положення «Знегажування». Знегажування проводити впродовж 15 – 20 хв.
7. Встановити перемикач «Рід роботи» в положення «Прогрівання» , яке здійснюється упродовж 30-ти хвилин.
8. Після прогрівання перемикач «Рід роботи» переводять в режим «Установка емісії», вивіряють значення  $0,5 \text{ ма.}$ , далі установлюють його в положення «Вимірювання» і коригують установку нуля.
9. Для проведення вимірювань перемикач «Множник шкали» встановити у положення, при якому відлік по шкалі стрілочного приладу буде достатнім для зчитування.

Тиск в системі визначається за формулою

$$P = C I_{\text{мка}},$$

$P$  – тиск, *мм рт. ст.*;

$C$  - постійна перетворювача, *мм рт. ст./мка*;

$I_{\text{мка}}$  - струм в *мка*.

Для сухого повітря  $C = 10^{-3}$  *мм рт. ст./мка*;

**Приклад вимірювання.** Відлік по шкалі складає 25 проділок, а перемикач знаходиться у положенні « $10^{-3}$ »; іонний струм при цьому

$$I = 25 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ мка.}$$

Отже, тиск в системі буде:  $P = C \cdot I_a = 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 2,5 \cdot 10^{-5}$  [*мм рт. ст.*].

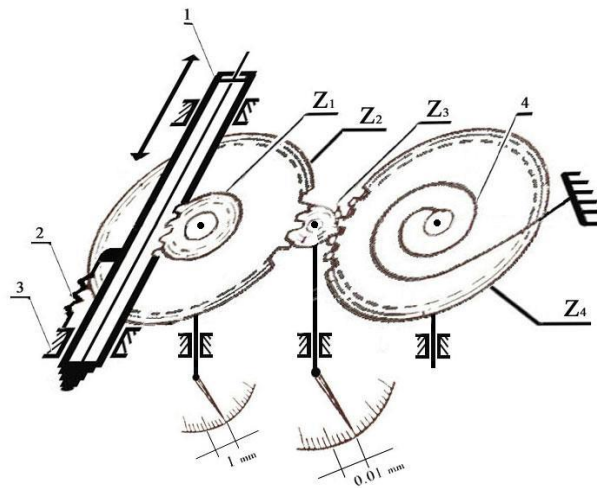
# Тема 3. Точність роботи приладів

## Дослідження на прикладі індикатора годинникового

### Аналітична частина

#### 3.1. Кінематична схема механізму

Будується за конструктивним виглядом (рис. 3.1). Вхідною ланкою є вимірювальний стрижень  $1$ , який має лінійну напрямну і здійснює поздовжнє переміщення в опорах  $3$ . Вихідне положення стрижня, при якому покази приладу нульові, нижнє. Його самовільний вихід у це положення забезпечується спіральною пружиною  $3$ , яка працює на розтяг. У центральній зоні поверхні стрижня нарізана зубчата рейка.



**Рис. 3.1. Конструктивний вигляд механізму індикатора годинникового**

Тип ІЧ – вимірювальний стрижень переміщується паралельно до шкали

$1$  – вимірювальний стрижень з нарізаною зубчатою рейкою;  $2$  – пружина зворотного ходу стрижня;  $3$  – стояк (корпус, база приладу);  $4$  – спіральна пружина (пружинна волосінь), що усуває мертвий хід у зубчатих зчепленнях;  $z_i$  – число зубців відповідного зубчатого колеса

Дана рейка зачеплена з зубчатим колесом  $z_1$ , на осі якого нерухомо закріплена стрілка шкали міліметрів. Колесо  $z_1$  нерухомо з'єднано з колесом  $z_2$ . Останнє зчеплене з колесом  $z_3$ , до якої нерухомо приєднана стрілка шкали циферблата (сотенна). Колесо  $z_4$ , яке зчеплене з колесом  $z_3$ , виконує пасивну функцію. З ним скріплена спіральна пружина  $4$  (пружинна волосінь), яка створює момент протидії руху вимірювального стрижня уверх, від начального положення, а також і обертання попередніх зубчатих коліс, що забезпечує односторонній контакт зубців у зчепленнях і у такий спосіб компенсується мертвий хід коліс (люфт зубчатих зчеплень).

### 3.2. Функція перетворення руху (ФПР)

Отже, кінематична схема механізму індикатора складена з двох кінематичних ланцюгів, у яких здійснюється перетворення руху: «зубчата рейка - зубчате колесо 1» та «зубчате колесо 2 - зубчате колесо 3». Як зазначалось, зубчаті колеса 1,2 взаємно нерухомі.

Використовуючи метод послідовних підстановок, можна отримати:

$$y = \frac{2}{mz_1} \frac{z_2}{z_3} x. \quad (3.1)$$

Тут  $m$  – модуль зубчатої пари «зубчата рейка - зубчате колесо 1».

У такому вигляді вихідна координата  $y$  – це кількість обертів стрілки при переміщенні вимірювального стрижня на відстань  $x$ .

Враховуючи, що  $m = r_t/\pi$ , отримаємо такий вираз для ФПР:

$$y = \frac{2\pi}{r_t} \frac{z_2}{z_1 z_3} x. \quad (3.2)$$

Тут  $r_t$  – подільний крок зубчатої рейки, що строго відповідає окружному кроку зубчатого колеса  $z_1$ , яке вступає у зчеплення з зубчатою рейкою.

У нас координата  $y$  – це кут повороту стрілки у градусах, якщо  $\pi = 180^\circ$ .

### 3.3. Розрахунки параметрів ланок механізму ІГ

В основу розрахунків закладені технічні умови (ТУ) на прилад. Нехай, як це зроблено у всіх типорозмірах індикатора, кругова шкала циферблата розбита на 100 проділок. Отже, величина кута (інтервал), що припадає на одну проділку, буде:  $\Delta y_{\text{інтерв.}} = 2\pi/100$ . Приймаємо, що мінімальне значення вимірюваного лінійного інтервалу, тобто ціна проділки,  $\Delta x_{\text{ц.пр.}} = 0,01 \text{ мм}$ .

Отже, чутливість ІГ, тобто масштаб перетворення вимірюваної величини буде:

$$S_{xy} = \frac{\Delta y_{\text{інтерв.}}}{\Delta x_{\text{ц.пр.}}} = \frac{2\pi}{100} \frac{1}{0,01} = 2\pi \text{ мм}^{-1}. \quad (3.3)$$

Для узгодження параметрів ланок механізму необхідно встановити передаточну функцію  $A_{xy} = \Delta y / \Delta x$ , яка отримується диференціюванням ФПР (формула (3.1)). Отже:

$$A_{yx} = \frac{2}{m} \frac{z_2}{z_1 z_3}. \quad (3.4)$$

Прирівняємо праві частини (3.3) та (3.4). Це дає змогу математично пов'язати параметри ланок механізму. Тоді:

$$2\pi = \frac{2}{m z_1} \frac{z_2}{z_3}. \quad (3.5)$$

Якщо використати (3.2), то буде справедливо:

$$2\pi = \frac{2\pi}{P_t z_1} \frac{z_2}{z_3}, \text{ або } P_t z_1 = \frac{z_2}{z_3}. \quad (3.6 \text{ а, б})$$

Для індикатора з вимірювальними  $\{0 \div 10\}$  мм межами як результат конструктивних рішень було прийнято, що  $z_2 = 100$ , а  $z_3 = 10$ . Такі величини забезпечать десятикратний масштаб перетворення, тобто при одному оберті колеса 2, з яким нерухомо з'єднана стрілка міліметрової шкали, зубчате колесо 3, з яким нерухомо закріплена стрілка сотенної шкали, обернеться десять разів. Тоді  $P_t z_1 = 10$ , або при  $z_1 = 16$  крок зачеплення зубчатої рейки  $P_t$  буде дорівнювати 0,625 мм.

Із рівності (9.5) знаходимо, що

$$m = \frac{1}{\pi} \frac{1}{z_1} \frac{z_2}{z_3} = \frac{1}{\pi} \frac{10}{z_3}. \quad (3.7)$$

Розрахунок показує, що при  $z_3 = 16$ , теоретичне значення модуля  $m_{\text{теор}} = 0,19894367886\dots$ ; на практиці таке ірраціональне значення реалізувати неможливо. Тому в існуючому індикаторі прийняте спеціальне значення модуля:

$m_{\text{пр}} = 0,199$  мм; найближчим в стандартному ряду є модуль  $m = 0,2$  мм.

## 3.4. Похибки механізму

### 3.4.1. Теоретична похибка параметрів

Відхилення модуля як конструктивного параметра від теоретично розрахованого складатиме величину:

$$\Delta m = |m_{\text{теор}} - m_{\text{пр}}| \approx 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ мм}. \quad (3.8)$$

Таке заокруглення наперед передбачає похибку роботи ІГ. Знайдемо похибку вимірювання величини  $x$  унаслідок такого заокруглення.

Для цього проведемо диференціювання залежності  $x = \frac{m z_1}{2} \frac{z_3}{z_2} y$ , по параметру  $\Delta m$ ; ця залежність одержана оберненим перетворенням з формули 3.1.

Отже,

$$\Delta x_{\Delta m} = \frac{z_1}{2} \frac{z_3}{z_2} y \Delta m. \quad (3.9)$$

Приведемо праву частину до входу, тобто врахуємо, що  $\frac{z_1}{2} \frac{z_3}{z_2} y = \frac{x}{m}$ . Буде:

$$\Delta x_{\Delta m} = \frac{x}{m} \Delta m. \quad (3.10)$$

Обчислимо цю похибку при конструктивному значенні модуля  $m = 0.199$  та вимірювальних межах  $x=10$  мм. Тоді:

$$\Delta x_{\Delta m} = \left( \frac{10}{0.199} \right) \cdot 5.6 \cdot 10^{-5} \approx 0.0028 \text{ мм}, \quad (3.11)$$

тобто похибка не перевищує 3 мкм.

Якщо призначити стандартний модуль

$$m_{ст} = 0.2 \text{ мм}, \text{ то } \Delta m = |m_{теор} - m_{пр}| \approx 1.06 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

Тоді розрахунки похибки за формулою (3.10) дадуть:

$$\Delta x_{\Delta m} = \left( \frac{10}{0.2} \right) \cdot 1.06 \cdot 10^{-3} \approx 0,053 \text{ мм},$$

тобто у п'ять разів перевищувала б ціну проділки.

З цієї причини і був встановлений спеціальний модуль  $m = 0.199$  мм.

*Висновки.* Причиною параметричної похибки є ірраціональне значення масштабу перетворення вимірювального ланцюга.  $S_{ух}$ , що пояснюється:

1) перетворенням виду рухів: поступального на вході в обертальне на виході;

2) замкнутістю кругової шкали, кутовий розмір якої завжди точно дорівнює  $2\pi$  і не може ділитися раціональним чином у десятковій системі числення.

Остання похибка властива всім механічним системам, у яких є перетворення поступального руху в обертаний.

Отже, похибка (9.11) закладена в розрахункову схему приладу, тому вона вважається теоретичною похибкою приладу.

### 3.4.2. Технологічні похибки

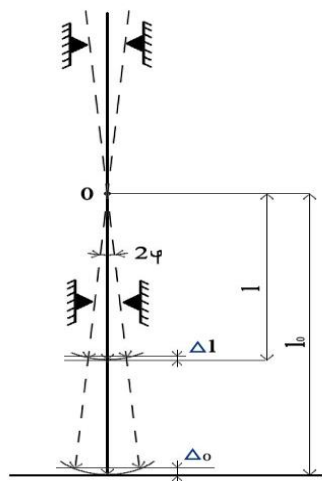
Технологічні (первинні) похибки зумовлюються: 1) неточністю виготовлення, 2) похибками монтажу елементної бази механізму.

Основними елементами механізму ІІ є зубчаті колеса, яким властиві: кінематична похибка, мертвий хід в зачепленні, радіальний биття валіків коліс у напрямних обертання, пружні прогини валіків, температурні деформації. Найбільш впливовими є кінематичні похибки, які зумовлені неточністю виготовлення окремих зубців. Ці похибки мають осцилюючий характер уздовж рівня абсолютної похибки внаслідок окружної замкнутості зубчатого колеса. Рівень абсолютної тобто зміщення показів приладу від номінального значення розміру, який підлягає вимірюванню, залежить від ступеня точності виготовлення зубчатих коліс. Мертвий хід у зачепленні та радіальне биття коліс мінімізується у приладі введенням у механізм протидіючих пружин.



Найбільший вплив на точність виявляє зчеплення «зубчата рейка – зубчате колесо 1», адже похибки, які виникають у цій парі, значно підсилюються наступними кінематичними ланками. Визначальним джерелом похибок у цій парі є поперечний (радіальний) люфт вимірювального стрижня, на якому безпосередньо нарізана рейка. Зазначимо, що цей люфт неминучий, оскільки стрижень мусить вільно переміщуватись в поздовжньому напрямку. Внаслідок цього шпарина у зубчатому зачепленні може збільшуватися, що викликає самовільне зміщення стрілки приладу від номінальних показів.

Звернемося до рис. 3.5, де показаний вимірювальний стрижень у вигляді суцільної лінії у напрямних лінійного переміщення. Центр гойдання стрижня незмінний і знаходиться між верхньою та нижньою опорою, тобто величина шпарини у зачепленні визначатиметься величиною шпарини поміж стрижнем і отворами напрямних. Крайні положення стрижня зображені штриховими лініями.



**Рис. 3.2. Вплив довжини вимірювального стрижня на точність роботи ІГ:**

$l$  – довжина плеча гойдання стрижня;  $\varphi$  – кут гойдання;  $\Delta_0$  – початкова похибка внаслідок гойдання стрижня,  $\Delta_1$  – похибка гойдання вимірювальної величини  $A_l$

Нехай стрижень знаходиться у початковому, тобто нижньому положенні. Абсолютна похибка вимірювальної величини складатиме величину  $\Delta_0$ , тобто різницю у віддалі поміж крайніми положеннями та нижнім, яку займає стрижень при гойданні відносно незмінного центру О. Якщо стрижень переміщати уверх (рис. 3.4 б), аж до крайнього верхнього положення (вимірювальна межа індикатора), то абсолютна похибка  $\Delta_1$  зменшуватиметься оберненій пропорції зменшенню плеча гойдання  $l$ , тобто обернено пропорційне зростанню інтервалу вимірювальної величини  $A_l$ .

## Лабораторна робота № 12

### Дослідження характеристик точності індикатора годинникового типу ІЧ

#### МЕТА РОБОТИ:

- оволодіння принципами досліджень характеристик точності приладів лінійних вимірювань на прикладі індикатора годинникового типу (ІГ);
- набуття навиків аналізу точності механізмів, які забезпечують функціональні перетворення у приладах і апаратах

#### ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ

1. Накреслити кінематичну схему механізму приладу.
2. Виявити активні кінематичні пари, встановити їх клас і розрахувати ступінь рухомості механізму за формулою Чебишева.
3. Методом послідовних підстановок вивести функцію перетворення руху (ФПР).
4. Провести частинне диференціювання ФПР для виявлення структури похибок роботи ІГ.
5. Вивчити правила експлуатації, освоїти методику проведення вимірювань за допомогою ІГ.
6. Провести дослідження характеристик точності індикатора.
7. Провести аналіз результатів, та установити причини неточності роботи приладу.

#### Обладнання, пристосування, матеріали

Прилад типу ІГ, вимірювальний стояк, набір мір довжини кінцевих з розмірами, що відповідають інтервалу вимірювань ІГ, матеріал для протирання

## МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Для графічного виконання кінематичної схеми ІГ використовується аксонометричне зображення механізму індикатора (рис 3.3) та умовні графічні зображення елементів кінематичних схем за ГОСТ 2.202.

Примітка. Виконання кінематичної схеми за аксонометричним зображенням демонструється у *Темі 1* даного посібника.

2. Користуючись методиками, викладеними у *Темі 1* та матеріалом з *Аналітичної* частини, скласти функцію перетворення руху для механізму ІГ.

3. Провести частинне диференціювання ФПР за змінними параметрами кінематичних елементів і вхідною координатою, та встановити вагові коефіцієнти впливу на точність роботи ІГ.

4. Підготовка інструментальної техніки до вимірювань. Уставити ІГ гільзою *11* (рис. 3.2) у посадочний отвір кронштейна стояка так, щоб забезпечити силове замикання торця вимірювального наконечника з площиною предметного столика. Для цього необхідно, щоб велика стрілка індикатора змістилася від початкового положення на 10 – 15 поділок. У такому положенні індикатор жорстко закріплюється гвинтом у кронштейні стояка. Далі, обертанням ободка *б*, вивести шкалу на нульовий показ. Перевірку установки нуля здійснюється легким постукуванням вказівним пальцем руки по головці вимірювального стрижня. На разі відходу стрілки від нуля провести корекцію установки шкали.

5. Провести навчальні вимірювання, використовуючи плоскі деталі відомої товщини; для самоконтролю ці процедури зручно виконувати використовуючи міри довжини.

6. Дослідження характеристики точності ІЧ проводиться з використанням мір довжини так.

6.1. Підбирається комплект мір з послідовно зростаючими розмірами у межах вимірювання конкретного типорозміру ІЧ. Наприклад, якщо атестації підлягає ІЧ з межами  $\{0 \div 10\}$  мм, то беремо міри 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; ... 10,0 мм, тобто не менше 10-ти точок, починаючи із найменшої наявної у комплекті міри (0,5 мм), і завершуючи мірою, що відповідає верхній межі інтервалу вимірювання - 10 мм. На початку інтервалу точки необхідно брати густіше, так як саме тут спостерігаються найбільші зміни точності вимірювань індикатора.

6.2. Проводяться вимірювання кожної із відібраних кінцевих мір. Кількість вимірювань окремої міри - не менше трьох. Кожне із цих вимірювань му- сить бути незалежним, тобто проводиться проміжна вивірка нуля шкали приладу. Результати вимірювань занести у таблицю 9.1.

Примітка. Відлік результатів вимірювань знімається з точністю до де- сятої долі інтервалу однієї проділки, тобто точність відліку складає 0,001 мм.

Таблиця 3.1 -Примірна таблиця результатів вимірювань і розрахунки характеристик точності ІЧ

A <sub>0</sub> , розмір міри, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	...	...	...	10,0
I-й вимір - A <sub>1</sub>											
II-й вимір - A <sub>2</sub>											
III-й вимір - A <sub>3</sub>											
$\tilde{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$											
δ											

У таблиці: A<sub>i</sub> - результат окремих незалежних вимірювань;  $\tilde{A}$  – середнє арифметичне значення; A<sub>0</sub> - номінальний розмір міри; δ – відносна похибка ви- мірювань,  $\delta = \left[ \frac{(\tilde{A} - A_0)}{A_0} \right] \times 100\%$ .

6.3. За результатами таблиці будується графічна залежність  $\delta = f(l)$ .

6.4. За ходом залежності проводиться аналіз стану працездатності та мож- ливих причин неточності роботи механізму ІЧ.

#### Протокол звіту містить:

1. Назву, мету, завдання до роботи.
2. Кінематичну схему, опис роботи механізму ІЧ.
3. Обрахувати ступінь рухомості механізму за формулою Чебишева.
4. Математичні процедури за п. 3, 4 «Завдання до роботи».
5. Результати досліджень характеристик точності індикатора.
6. Аналіз результатів та причин неточності роботи приладу

## Контрольні запитання та завдання

1. Які механізми називають функціональними?
2. Який елементарний механізм використовується у ІГ для перетворення поступального руху стрижня в обертовий? Запишіть функцію перетворення руху цього механізму.
3. Проведіть аналіз кінематичної схеми механізму ІГ.
4. Які конструктивні заходи використані для усунення мертвого ходу ланок механізму?
5. При експлуатації ІГ у яких випадках необхідне використання мір довжини?
6. Проведіть аналіз причин неточності роботи ІГ та їх ваговий вклад у похибку приладу.
7. На підставі чого проводять розрахунки основних розмірів (параметрів) ланок функціональних механізмів?
8. Укажіть структуру похибок роботи приладів.
9. Чим викликані теоретичні похибки приладів (механізмів)?
10. Якого виду похибок позбутися практично неможливо?

## Додаток Б

### Розрахунок похибок роботи трубчастого манометра

Для розрахунків похибок роботи довільної механізму або іншої технічної системи (напр., оптико-механічної) необхідне знання функції перетворення сигналу. Далі проводиться частинне диференціювання цієї функції по змінним параметрам. Покажемо принцип знаходження похибок на прикладі механічного манометра, який був розглянутий вище у Темі 1. Отримана функція перетворення руху механічного манометра мала такий вигляд:

$$Y = i_1 \lambda R_{TP} (z_5 R_7 / z_6 R_3) (p - p_0). \quad (3.12)$$

Тут:  $z_5$  – повна кількість зубців колеса, з якого виготовлений сектор 5, а  $z_6$  – кількість зубців трибки 6 (рис.3.3);  $i_1 = (R_3 \sin 2\varphi / R_2 + \sin \varphi)$  – передаточне відношення кривошипно-шатунної передачі.

**Похибки роботи механізму манометра.** Для встановлення структури похибок проведемо частинне диференціювання функції перетворення руху за формулою Тейлора.

Нагадаємо, що якщо функція задана багатьма змінними, тобто

$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , то формула Тейлора у першому наближенні записується так:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i.$$

Для ФПС манометра змінними координатами виступають усі складники формули (Б.9), за винятком параметрів  $(z_5, z_6)$ . Знайдемо загальну похибку роботи манометра. Проведемо частинне диференціювання (А9). Буде:

$$\Delta Y = \frac{\partial f}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial f}{\partial R_{TP}} \Delta R_{TP} + \frac{\partial f}{\partial R_7} \Delta R_7 + \frac{\partial f}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial f}{\partial (p - p_0)} \Delta (p - p_0). \quad (3.13)$$

**Теоретична**, або схемна похибка представлена першим членом розкладу

$$\Delta y_{\Delta f} = \frac{\partial f}{\partial i_1} \Delta i_1, \text{ так як при встановленні функції перетворення сигналу (руху)}$$

приймались такі припущення: 1) заміна дугового руху трубчатого пружини рухом по прямій траєкторії; 2) передаточне відношення кривошипно-шатунного механізму  $i_1 \approx 1$ .

Здійснити числову оцінку похибки за другим припущеннями не складає особливих проблем. Нехай зміна кута  $\varphi$  знаходиться у межах від 60 до 90 градусів. Звертаючись до рис. 1.7, знаходимо, що відхилення передаточного відношення від одиниці у цих межах зміни кута  $\varphi$  не перевищує 0,02, тобто  $\Delta i_1 \approx 2\%$ .

**Похибки експлуатації**  $\Delta y_{\Delta t} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda$ . До цієї групи відносимо зміну пружності матеріалу пружини  $\Delta \lambda$  впродовж часу експлуатації як наслідок його зморення, так і вплив температурних змін на пружність. Мінімізацію впливу  $\Delta y_{\Delta t}$  можна здійснити конструктивно введенням в механізм відповідно регулятора нуля і температурного компенсатора.

**Технологічні похибки**  $\Delta y_{\Delta q} = \frac{\partial f}{\partial R_{TP}} \Delta R_{TP} + \frac{\partial f}{\partial R_7} \Delta R_7 + \frac{\partial f}{\partial R_3} \Delta R_3$ . Це похибки неточності виготовлення розмірів  $q$  окремих деталей механізму. Точність виготовлення залежить від класу точності приладу, який указується у технічній документації на прилад (паспорті).

**Похибки зчитування сигналу**  $\Delta y_{\Delta x} = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p$ . Під вхідною координатою  $x$  розуміємо тиск у системі  $p$ , який підлягає вимірюванню. Тиск, який розвивається у трубці манометра, буде дещо відрізнятися від тиску у системі внаслідок обмеженості отвору у приєднувальному штуцері.

## Список літератури

1. Грейм И.А. Элементы проектирования и расчет механизмов приборов. – Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
2. ЕСКД: Умовне графічне зображення кінематичних елементів: ГОСТ 2.770 – 68; Правила виконання схем: Схеми кінематичні, ГОСТ 2.701-84, 2.703-68, 2.721-74.
3. Житарюк В.Г. Функціональні перетворення в приладах і апаратах. – Чернівці, Рута, 2002. 80 с.
4. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. – М.: Машиностроение, 1987. 560 с.
5. Машиностроение. Терминология: справочное пособие. Вып. 2. – М.: Изд.-тво стандартов, 1989. 432 с.
6. Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. – Л.: Машиностроение, 1973. 696 с.
7. Заблонский К.И., Беляев М.С., Телис И.Я. и др. Проектирование механизмов и приборов. – К.: Вища школа, 1971. 520 с.
8. Кулагин В.В. Основы конструирования оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.
9. Расчет и конструирование механизмов и деталей приборов. Под ред. Ф.Л. Литвина. – Л.: Машиностроение, 1975. 200 с.

***Навчальне видання***  
**Функціональні перетворення в технічних системах:**  
**прилади та поліграфія**  
*Навчальний посібник до лабораторного практикуму*

Укладачі  
***Ангельський Олег В'ячеславович***  
***Житарюк Віктор Григорович***  
***Зенкова Клавдія Юріївна***

Літературний редактор ***Лукул О.В.***

*Свідоцтво про державну реєстрацію*  
Підписано до друку      Ум. друк. арк.  
Друкарня видавництва "Рута" Чернівецького національного університету  
58012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2