Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Методичні вказівки до виконання курсової роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування
(17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації)
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка
(176 Мікро- та наносистемна техніка)
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2024

УДК 681.5.08(07)
К64

До друку
Голова вченої ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій_____ І. С. Кондіус

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ
Директор бібліотеки _____ Н. П. Поліщук

Затверджено вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2024 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2024 року
Завідувач кафедри АКІТ _____ Ю. С. Лапченко

Укладач: _____ В. Ю. Денисюк, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

Рецензент: _____ Р. Г. Редько, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: _____ Ю. С. Лапченко, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

К-64 **Контрольно-вимірювальні прилади** : методичні вказівки до виконання курсової роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування (17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації) спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка (176 Мікро- та наносистемна техніка) денної та заочної форм навчання / уклад. В. Ю. Денисюк. Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2024. 52 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Контрольно-вимірювальні прилади». Представлено приклади проектування конструкцій вимірювальних пристроїв з пневматичним та індуктивним перетворювачами, методика їх розрахунку, а також подані необхідні додаткові матеріали.

В.Ю. Денисюк, 2024

ЗМІСТ

Стор.
ВСТУП ……. 4
1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ ……. 5
1.1 Варіанти завдань і вихідні дані до виконання курсової роботи ……... 6
1.2 Зміст пояснювальної записки та графічної частини …….. 9
1.3 Графічна частина ……... 11
1.4 Вимоги до оформлення курсової роботи ……..… 11
2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСЛІДОВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ……... 13
2.1 Пневматичні прилади …… 13
2.1.1 Принцип роботи ……. 13
2.1.2 Пневматичні перетворювачі ……. 14
2.1.3 Вимірювальні схеми пневматичних приладів ……. 15
2.1.4 Вибір параметрів вимірювальних схем за заданими метрологічними характеристиками …….. 18
2.1.5 Пневматичні диференціальні прилади ……. 19
2.1.6 Розрахунок пневматичних диференціальних схем ….. 21
2.1.7 Компенсаційні пневматичні вимірювальні прилади ... 24
2.1.8 Розрахунок компенсаційних пневматичних вимірювальних приладів ……... 26
2.1.9 Особливості вибору параметрів вимірювальних схем з декількома вимірювальними соплами (комбінованим соплом) ……. 29
2.2 Індуктивні перетворювачі …… 30
2.2.1 Принцип дії ……. 30
2.2.2 Вимірювальні схеми індуктивних приладів …… 34
2.2.3 Розрахунок індуктивних перетворювачів …… 35
3 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ……. 41
3.1 Приклад розрахунку пневматичного диференціального перетворювача ……... 41
3.2 Приклад розрахунку компенсаційного пневматичного вимірювального перетворювача …….. 43
3.3 Приклад розрахунку індуктивного перетворювача …… 45
ЛІТЕРАТУРА …….. 50

ВСТУП

Відповідно до навчального плану здобувачів спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка (176 Мікро- та наносистемна техніка) при вивчені курсу «Контрольно-вимірювальні прилади» передбачено виконання курсової роботи.

Сучасне виробництво в різних галузях промисловості характеризується складністю технологічних процесів, які забезпечують високу якість продукції. Останнє неможливе без автоматизації виробничого процесу. Автоматизація технологічного виробництва передбачає автоматичний контроль технологічних параметрів, автоматичне регулювання та автоматизоване управління, а також захист процесів від аварійних режимів, захист навколишнього середовища.

Для забезпечення автоматичного контролю, регулювання та управління необхідно володіти інформацією про стан та параметри технологічного процесу. Цю інформацію дістають шляхом проведення технологічних вимірювань. Основними засобами отримання інформації, яке здійснюється за допомогою вимірювальних автоматизованих систем, є вимірювальні пристрої.

Залежно від форми представлення сигналу вимірювальної інформації вимірювальні пристрої поділяють на вимірювальні прилади та вимірювальні перетворювачі.

Вимірювальний прилад – засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Вимірювальна інформація, як правило, подається у вигляді переміщення вказівника відносно шкали, переміщення пера на діаграмі або у вигляді цифр, які з’являються на табло.

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у вигляді, зручному для передачі, подальшого перетворення, обробки та зберігання, але не призначений для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Вимірювальна інформація, як правило, подається у вигляді сигналів постійного або змінного струму або напруги, тиску стиснутого повітря або рідини, частоти гармонічних коливань, послідовності прямокутних імпульсів тощо.

Важливими технологічними параметрами, які доводиться вимірювати при автоматизованому виробництві в машино- та приладобудуванні, є лінійні розміри деталей. Їх вимірювання здійснюється за допомогою пристроїв, які складаються з вимірювальних приладів і перетворювачів. Одними з розповсюджених при цьому вимірювальних перетворювачів є пневматичні та індуктивні перетворювачі.

Автоматизація контрольних операцій може здійснюватися у технологічному процесі як за активного операційного, так і за післяопераційного контролю, які є принципово різними напрямками застосування технічного контролю. Обидва методи мають важливе значення з огляду забезпечення необхідної якості продукції.

За допомогою засобів вимірювання ми отримуємо інформацію про розмірні параметри, або, у загальному, про якість продукції. Але не менш важливе значення має й інша функція засобів вимірювання – функція регулювання й управління, яка здійснюється у формі «активізації» керування технологічними процесами. Розвиток активного контролю є дуже важливою умовою підвищення якості виробів, автоматизації технологічних процесів високої точності, зниженню витрат від браку та витрат на контрольні функції.

Виконуючи курсову роботу, здобувачі вищої освіти повинні проаналізувати запропоновану вимірювальну схему, засвоїти принцип побудови та проектування вимірювальних пристроїв, методи розрахунку та проектування їх основних елементів і перетворення вимірювальних сигналів, а також розробити та оформити необхідну проектно-конструкторську документацію.

Основне призначення методичних вказівок – допомогти здобувачам вищої освіти у розв’язанні практичних задач під час виконання курсової роботи, виходячи з конкретних умов, що вказані в індивідуальному завданні. З цією метою у методичних вказівках представленні приклади конструкцій вимірювальних пристроїв з пневматичним та індуктивним перетворювачами і їх розрахунку, а також подані необхідні додаткові матеріали.

1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

Тема курсової роботи: Вимірювальний пристрій для контролю лінійного розміру деталі (висоти, довжини, внутрішнього або зовнішнього діаметра) з пневматичним або індуктивним первинним перетворювачем.

Мета курсової роботи – формування у здобувачів вищої освіти знань та умінь з проектування пристроїв для вимірювання технологічних параметрів в системах автоматизації управління технологічним процесом на прикладі вимірювання лінійного розміру деталі; здійснення необхідних розрахунків елементів пристроїв автоматизації; оформлення необхідної проектно-конструкторської технічної документації згідно вимог ЄСКД.

Основою для виконання курсової роботи є знання з: методів і засобів автоматичного контролю, основ електроніки, основ електричних вимірювань електричних та неелектричних величин, основ метрології, основ гідропневмоавтоматики, технологічних вимірювань та приладів, а також завдання видане викладачем у вигляді технічної ідеї або базового варіанту контрольної системи та вихідних даних.

Захист курсової роботи здійснюється на кафедрі автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій після перевірки її викладачем та допуску до захисту. Здача курсової роботи на перевірку не пізніше 5 днів до терміну захисту.

1.1 Варіанти завдань і вихідні дані до виконання курсової роботи

Варіанти завдань і вихідні дані до виконання курсової роботи представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Варіанти завдань і вихідні дані до виконання курсової роботи

№ варіанта	№ схеми	Розміри параметрів, що контролюються							Тип вимірювального перетворювача	Кількість вихідних команд керування	Діапазон вимірювання, мм	Похибка спрацьовування, %	Передатне відношення	Вхідний опір підсилювача, Ом	Вхідний тиск $H \cdot 10^5$, МПа
		Висота, мм	Довжина, мм	Зовнішній діаметр, мм	Внутрішній діаметр, мм	Відстань, мм	Діапазон відхилень, мкм	Товщина, мм							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	10							І	1	0-0,2	0,5	1:2	150	
2	1	20							Пн	2	0-0,1	1	1:2		1,0
3	1	30							І	3	0-0,3	1,5	2:1	200	
4	1	40							І	4	0-0,5	2	2:1	250	
5	1	50							Пн	5	0-0,3	0,5	1:1		1,5
6	2	5							І	1	0-0,3	1	1:1	300	
7	2	15							І	2	0-0,5	1,5	1:1	350	
8	2	25							Пн	3	0-0,2	2	1:1		2,0
9	2	35							І	4	0-0,5	0,5	1:1	150	
10	2	45							І	5	0-0,2	1	1:1	200	
11	3		10						І	1	0-0,2	1,5	1:2	250	
12	3		20						І	2	0-0,1	2	1:2	300	
13	3		25						І	3	0-0,3	0,5	1:1	350	
14	3		30						І	4	0-0,5	1	2:1	150	
15	3		35						І	5	0-0,1	1,5	2:1	200	
16	4			40					Пн	1	0-0,2	2	5:1		1,0
17	4			60					І	2	0-0,1	0,5	1:2	250	
18	4			70					Пн	3	0-0,3	1	2:1		1,5
19	4			80					І	4	0-0,5	1,5	2:1	300	
20	4			90					Пн	5	0-0,1	2	5:1		2,0
21	5			30					І	1	0-0,2	0,5	1:1	350	
22	5			45					Пн	2	0-0,3	1	1:1		1,0
23	5			55					І	3	0-0,3	1,5	1:1	150	
24	5			75					Пн	4	0-0,2	2	1:1		1,5
25	5			95					І	5	0-0,4	0,5	1:1	200	
26	6				20				Пн	1	0-0,2	1	1:1		2,0
27	6				30				І	2	0-0,3	1,5	1:1	250	
28	6				40				Пн	3	0-0,4	2	1:1		1,0
29	6				60				І	4	0-0,5	0,5	1:1	300	
30	6				70				Пн	5	0-0,1	1	1:1		1,5
31	7					20			І	1	0-0,2	1,5	1:2	350	
32	7					40			Пн	2	0-0,1	2	5:1		2,0

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
33	7					60			І	3	0-0,3	0,5	1:1	150	
34	7					80			Пн	4	0-0,5	1	1:2		1,0
35	7					90			І	5	0-0,1	1,5	2:1	200	
36	8						4		Пн	1	0-0,2	2	1:1		1,5
37	8						6		І	2	0-0,1	0,5	1:1	250	
38	8						7		Пн	3	0-0,2	1	1:1		2,0
39	8						8		І	4	0-0,5	1,5	1:1	300	
40	8						9		Пн	5	0-0,3	2	1:1		1,0
41	9				25				Пн	1	0-0,2	0,5			1,5
42	9				35				Пн	2	0-0,1	1			2,0
43	9				55				Пн	3	0-0,3	1,5			1,0
44	9				75				Пн	4	0-0,5	2			1,5
45	9				95				Пн	5	0-0,1	0,5			2,0

Умовні позначення: тип вимірювального перетворювача Пн – пневматичний; І – індуктивний.

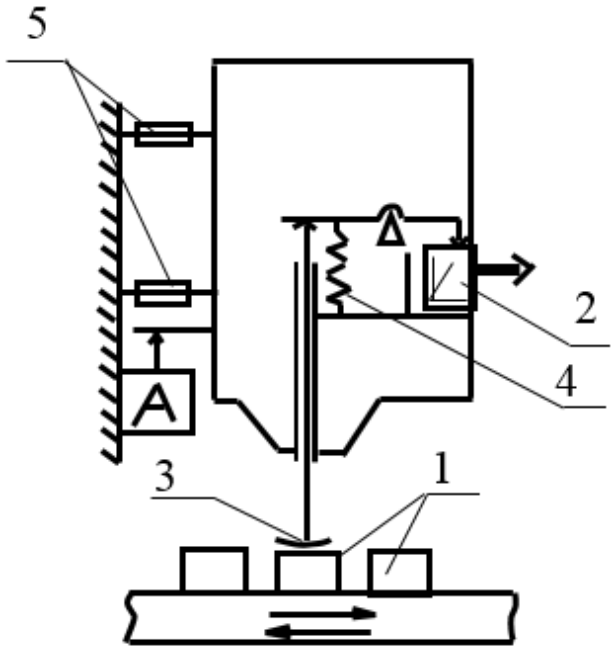


Рисунок 1 – Вимірювальний пристрій для контролю висоти деталей

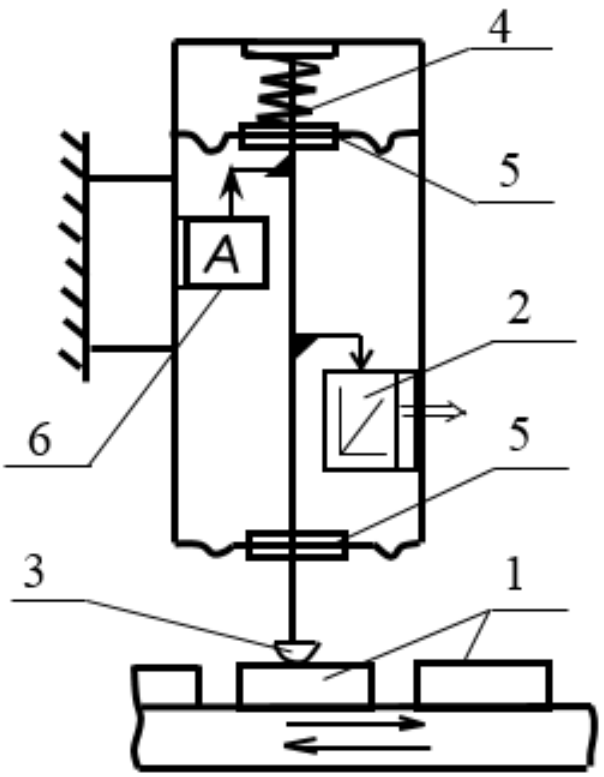


Рисунок 2 – Вимірювальний пристрій для контролю висоти деталей

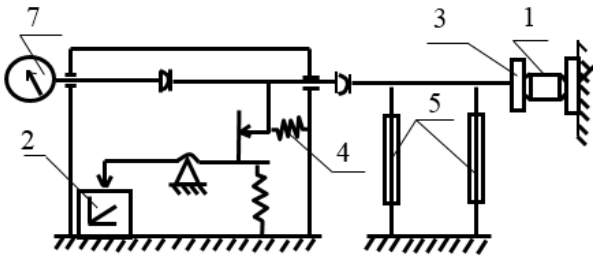


Рисунок 3 – Вимірювальний пристрій для контролю довжини деталі

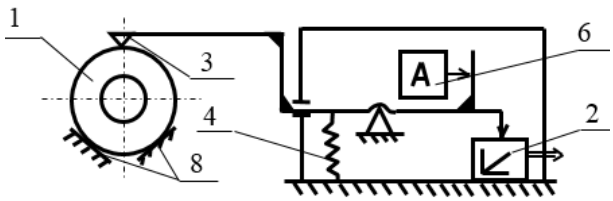


Рисунок 4 – Вимірювальний пристрій для контролю зовнішнього діаметра з фіксованим базуванням деталі

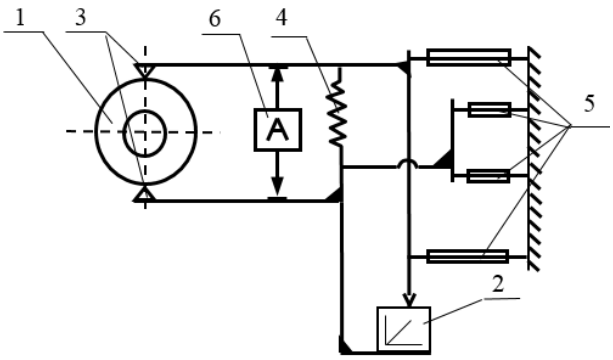


Рисунок 5 – Вимірювальний пристрій для контролю зовнішнього діаметра деталі

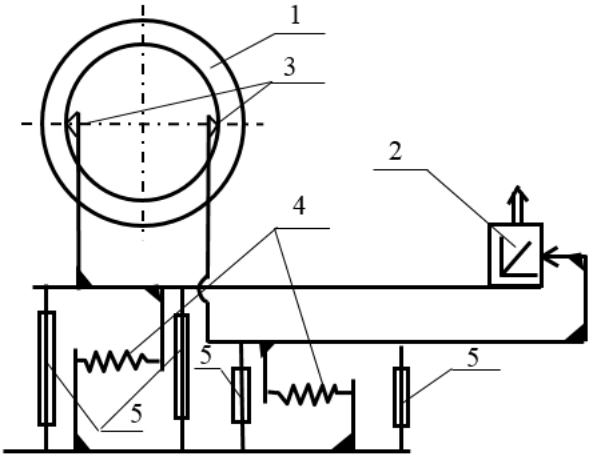


Рисунок 6 – Вимірювальний пристрій для контролю внутрішнього діаметра деталі

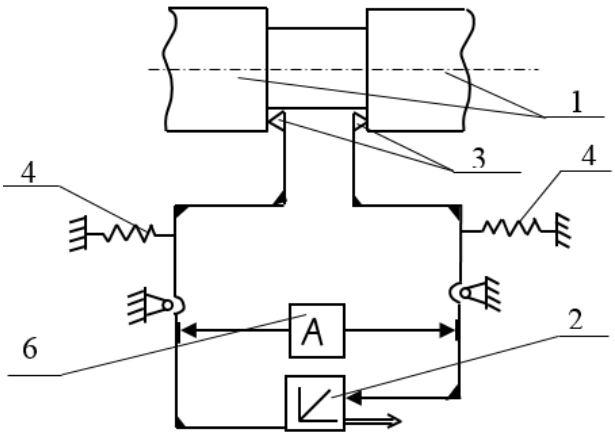


Рисунок 7 – Вимірювальний пристрій для контролю відстані між торцями деталі

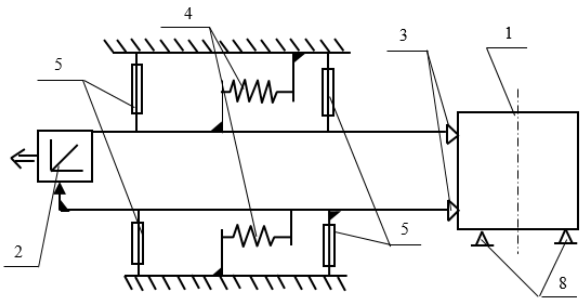


Рисунок 8 – Вимірювальний пристрій для контролю відхилення від перпендикулярності осі до торця деталі

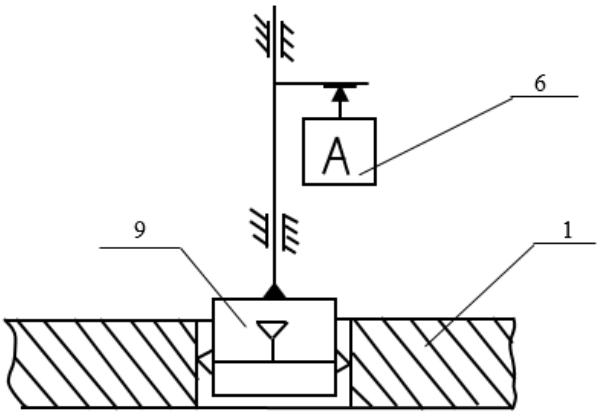


Рисунок 9 – Вимірювальний пристрій для контролю діаметра отворів

На рисунках 1-9 приведено схеми вимірювальних пристроїв. На схемах цифрами позначено:

1 – деталь (параметр), що контролюється;

2 – вимірювальний перетворювач;

3 – вимірювальний щуп;

4 – циліндрична пружина для створення вимірювального зусилля;

5 – плоскі пружини передаточних механізмів;

6 – пристрій відведення вимірювального щупа від контрольованих поверхонь (пристрій аретування);

7 – мікрометричний індикатор;

8 – додаткові поверхні базування деталей;

9 – комбіноване пневматичне сопло;

А – пристрій аретування.

1.2 Зміст пояснювальної записки та графічної частини

Курсова робота складається з пояснювальної записки та графічної частини.

Зміст пояснювальної записки:

Вступ. Коротко охарактеризувати тему курсової роботи, її сутність. (1 лист).

1. Аналіз завдання і технічне обґрунтування. Розглянути метод вирішення поставленої задачі, обґрунтувати конструктивні рішення окремих вузлів і пристрою в цілому (3-4 листи).

1.1 Аналіз вихідних даних. Привести вимоги щодо вибору засобів контролю та вимірювання. Проаналізувати вихідні дані до курсового проекту, зробити висновки щодо діапазону вимірювання, точності вимірювання, умов проведення вимірювання, типів вимірювальних перетворювачів та вторинних вимірювальних приладів, пристроїв аретування і тощо.

1.2 Аналіз вимірювальної схеми. Проаналізувати схему вимірювання, вказати її особливості, особливості компонування, особливості функціонування та взаємодії вузлів, тип вимірювального перетворювача, його принцип дії, тип вторинного приладу, його принцип дії, реалізацію вихідних

команд керування та їх настроювання, реалізацію відліку показів. Описати принцип роботи всієї вимірювальної системи.

1.3. Базування деталі та вимірювального перетворювача. Привести та обґрунтувати схему базування деталі та вимірювального перетворювача разом з передаточним механізмом. Охарактеризувати особливості базування деталі та вимоги до базування. Скомпонувати та описати принцип дії механізму виведення вимірювальних щупів із зони вимірювання (механізму аретування), тип та принцип дії якого студент вибирає самостійно.

2 Розрахункова частина. Привести повний розрахунок вимірювального перетворювача, вимірювальної схеми, окремих елементів і деталей конструкції (6-7 листів).

2.1 Розрахунок давача вимірювального перетворювача (індуктивний, пневматичний).

3 Конструкторська частина. Описати конструкцію перетворювача, окремих вузлів, деталей, їх взаємодію. Описати принцип дії. За необхідності привести ескізи, схеми, обґрунтування та розрахунок розмірів (4-5 листів).

3.1 Конструювання первинного вимірювального перетворювача з передаточним механізмом. Передаточний механізм призначений для передачі вимірювальної інформації від вимірюваної деталі до вимірювального перетворювача із найменшою похибкою, а також для запобігання дії вимірюваної деталі на шток перетворювача. Виходячи з компонувальної схеми вимірювального перетворювача, спроектувати та виконати конструювання передаточного механізму і його окремих деталей згідно з вимогами до точності вимірювання та жорсткості, а також вимог до умов роботи давача. При необхідності привести ескізи окремих деталей та вузлів. Робота вимірювального перетворювача повинна враховувати особливості деталей, які контролюються, та умови виведення вимірювальних щупів із зони вимірювання, а також особливості встановлення (базування) вимірювального перетворювача і давача.

3.2 Проектування і компонування вимірювального пристрою та розробка складального креслення. Як було сказано вище, компонування вимірювального пристрою повинно враховувати вимоги щодо точності рухів рухомих елементів та точності вимірювання і жорсткості, а також умов захисту вимірювального перетворювача. Конструктивні рішення, схеми та розміри вимірювальної станції залежать від метрологічних і експлуатаційних вимог, функціонального розташування станції у технологічному процесі; розмірів, маси і фізико-механічних властивостей контрольованої деталі; принципу і методу вимірювання. При проектуванні вимірювального пристрою необхідно враховувати наступні вимоги: оптимальну точність вимірювання; незначну зміну характеристик від впливових величин (температури, вібрації і тощо), стабільність характеристик у часі, високу продуктивність вимірювань, малий гістерезис передаточного механізму, високу стійкість проти спрацьовування вимірювальних та базуючих поверхонь, відсутність пошкоджень вимірюваних поверхонь, зручність встановлення деталей на

вимірювальну станцію.

Приклади компонування деяких вимірювальних вузлів та їх загальний вигляд наведені в додатках.

Висновки. Коротко підсумувати результати виконаної роботи. (1 лист).

Додатки. Специфікації до складальних креслень та перелік елементів до принципових схем.

1.3 Графічна частина

Виконується на 2 листах формату А1.

Лист 1: вимірювальна схема (ф. А3). Слід відзначити, що вимірювальні схеми (рис. 1-9) пояснюють лише принцип вимірювання, тому можна вносити зміни в кінематичну схему, включати додаткові вузли, елементи (або виключати задані), змінювати методи базування, тощо. Схема принципова первинного перетворювача разом з вторинним вимірювальним приладом (електрична чи пневматична) (ф. А3). Загальний вигляд приладу (креслення вимірювального пристрою в комплекті з відліково-командним (вторинним) приладом (ф. А2),

Лист 2: складальне креслення вимірювального пристрою (ф. А1).

1.4 Вимоги до оформлення курсової роботи

Розрахунково-пояснювальну записку виконують відповідно до вимог і завдання за змістом розрахунків і розміщують на одній стороні листа формату А4 (ДСТУ 4163:2020).

Кожен розрахунок повинен містити:

– заголовок з вказівкою змісту виконаного розрахунку;

– розрахункові дані до ескізів або конструктивних схем;

– розрахункові формули з посиланням на літературу;

– обчислення необхідних параметрів.

Ілюстрації (ескізи, схеми і графіки) нумеруються по всій записці (Рисунок 1 – Назва рисунка). При розрахунку на ПЕОМ додається роздруківка програм і результатів.

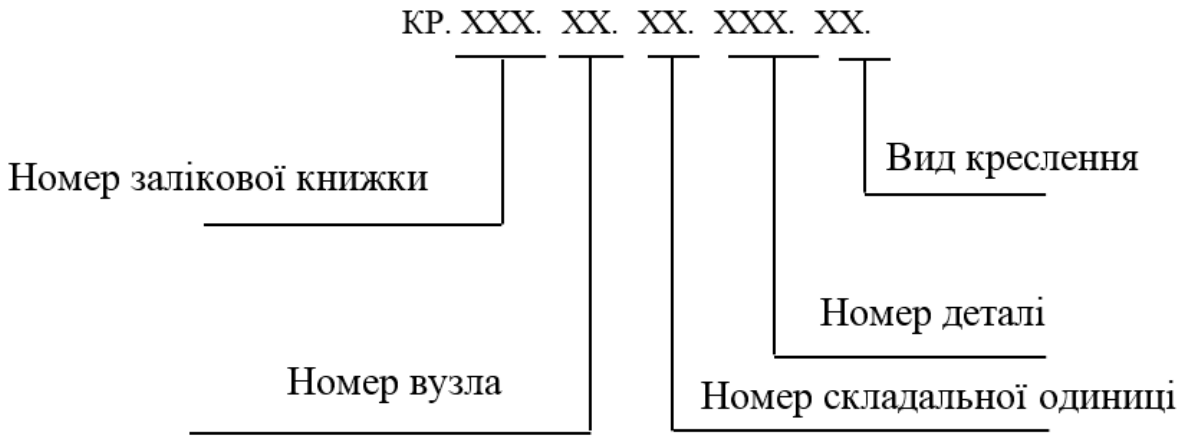
Зміст записки розбивають на розділи і підрозділи у відповідності із запропонованим змістом.

Розрахунково-пояснювальна записка виконується на листах з надписами за ДСТУ Б А.2.4-4:2009.

Креслення загального виду для технічного проекту виконується відповідно до ДСТУ Б А.2.4-4:2009. Розміри і граничні відхилення повинні наноситись відповідно до ДСТУ Б А.2.4-4:2009.

Записку брошурують в обкладинку з паперу для креслення. Лицеву сторону обкладинки оформляють у вигляді титульного листка відповідно до вимог кафедри. На всіх наступних листах проставляється порядковий номер (2, 3, 4, і т. д.).

Порядок виконання позначення
на кресленнях та в пояснюючій записці



Позначення виду креслення

Е1 – схема електрична принципова
Е2 – схема електрична функціональна
К1 – схема кінематична
СК – складальне креслення
ВЗ – вигляд загальний
ПЗ – пояснююча записка
П3 – схема пневматична принципова
С1 – схема структурна
С2 – схема функціональна
СП – специфікація
ПЕ – перелік елементів

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСЛІДОВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ

2.1 Пневматичні прилади

2.1.1 Принцип роботи

У пневматичних приладах для лінійних вимірювань використана залежність між площею *f* прохідного перерізу каналу витікання і витратами *G* стиснутого повітря. Площа каналу витікання змінюється за рахунок вимірюваного лінійного переміщення.

Таким чином, $G=\varphi(P,f)$, де *P* – тиск повітря, під яким він витікає через прохідний переріз каналу площею *f*.

Вимірюючи витрати *G* при сталому тиску *P*, ми можемо оцінювати розміри деталі, що контролюється.

Пневматичний прилад в загальному виді може бути представлений блок-схемою, зображеною на рисунку 10, на якому подано наступні позначення:

П – первинний пневматичний перетворювач – пристрій, який сприймає лінійні переміщення деталі 1 і перетворює їх у відповідні зміни витрат повітря;

ВС – вимірювальна пневматична схема, яка призначена для перетворення сигналу первинного перетворювача у зручний для вимірювання витрат інший параметр – тиск, швидкість;

Ук – вказівний пристрій, який служить для відтворення вимірюваної величини в прийнятих одиницях вимірювання;

К – командний пристрій, який призначений для подачі сигналів-команд для керування технологічним процесом;

С – стабілізатор тиску;

Ф – фільтр очищення повітря;

ДП – джерело стиснутого повітря.

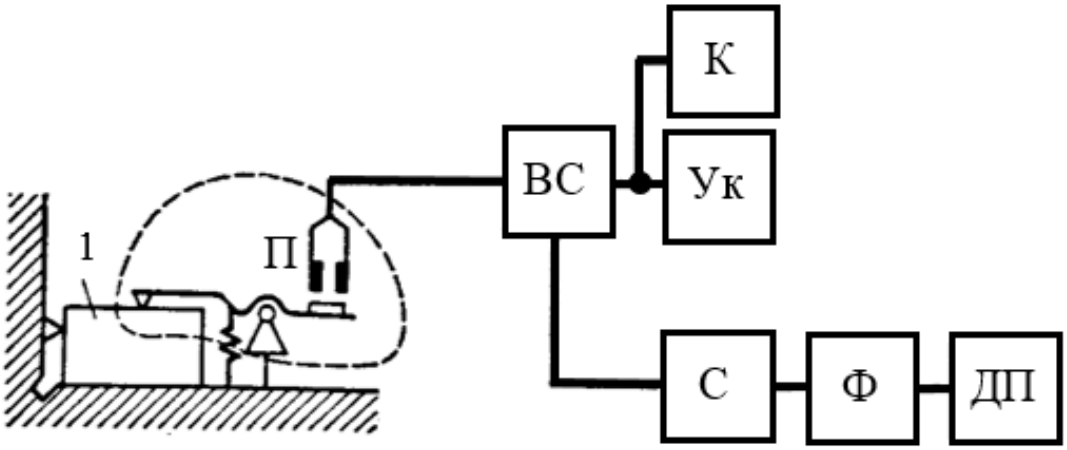


Рисунок 10 – Блок схема пневматичного приладу

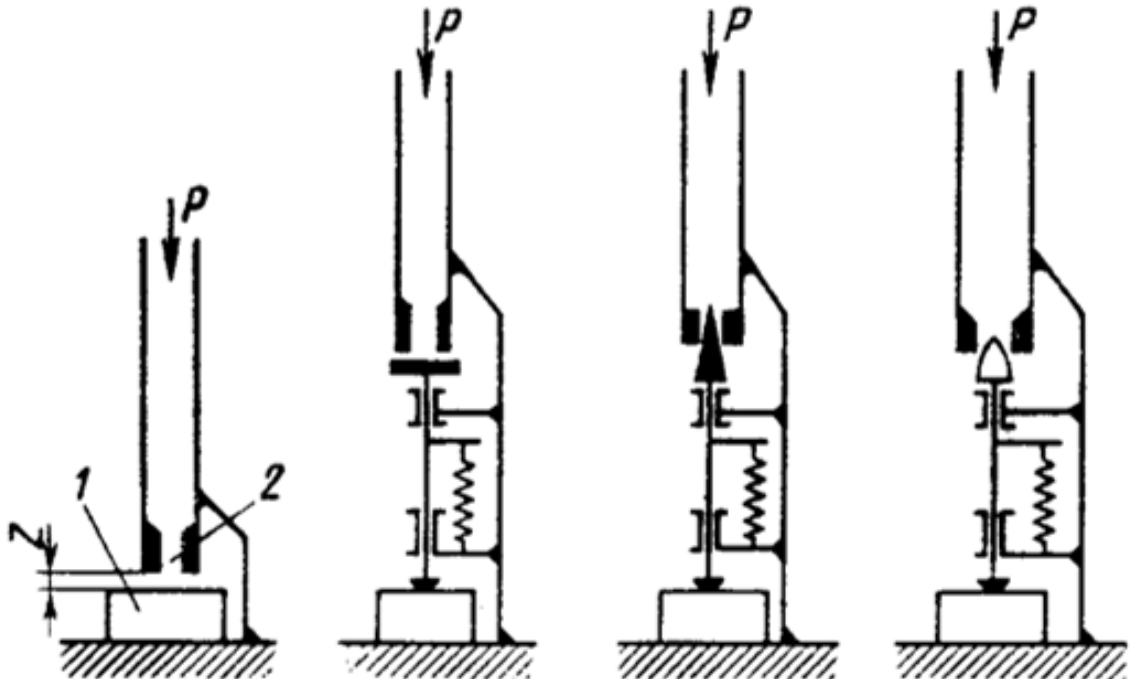
Пневматичні прилади володіють високою точністю, дозволяють проводити дистанційні вимірювання, малогабаритна пневматична вимірювальна оснастка дозволяє проводити вимірювання у відносно

важкодоступних місцях і створювати найбільш прості конструкції багатовимірних пристроїв для контролю практично будь яких лінійних параметрів деталі.

Однак для роботи пневматичних приладів необхідна повітряна мережа з певним тиском повітря, підготовка якого вимагає особливої уваги в процесі експлуатації приладу. Пневматичні прилади мають значну інерційність, що знижує їх продуктивність. Однак останній недолік іноді є позитивною якістю приладу, оскільки створює нечутливість його до вібрацій.

2.1.2 Пневматичні перетворювачі

При безконтактному вимірюванні деталі пневматичний перетворювач, показаний на рисунку 11, (а), являє собою вимірювальне сопло 2, заслінкою якого служить контрольована деталь 1, встановлена на віддалі *z* від сопла.



а) б) в) г)

Рисунок 11 – Принципові схеми пневматичних перетворювачів:
а, б – з плоскою заслінкою; в – з конічною заслінкою; г – заслінка – параболоїд обертання

Витрати повітря у цьому випадку будуть визначатися площею кільцевого зазору f_2, утвореного торцем вимірювального сопла з діаметром прохідного перерізу d_2 і поверхнею контрольованої деталі:

$$f_2 = \pi d_2 z. \tag{1}$$

Практично вимірювання можливе за умови:

$$\pi d_2 \le \frac{\pi d_2^2}{4}, \text{ тобто } \quad z \le 0{,}25 d_2. \tag{2}$$

У протилежному випадку зміна площі каналу витікання не буде залежати від зміни z.

Перетворювачі з плоскою заслінкою можуть виконуватись і для проведення контактних вимірювань (рис. 11, б).

Через простоту виготовлення ці перетворювачі дуже широко використовуються у пневматичних приладах.

З метою збільшення меж вимірювання використовують перетворювачі з заслінкою у вигляді конуса (рис. 11, в), параболоїда (рис. 11, г), кулі тощо.

Прохідний переріз площею f_2 у перетворювачів з конічною та кульовою заслінкою нелінійно залежить від переміщення. Вони вносять деяку нелінійність у загальну характеристику приладу. Тому застосування таких датчиків обмежено. Для побудови широкомежних пневматичних приладів з рівномірною (лінійною) шкалою використовують перетворювачі з заслінкою у вигляді параболоїда обертання.

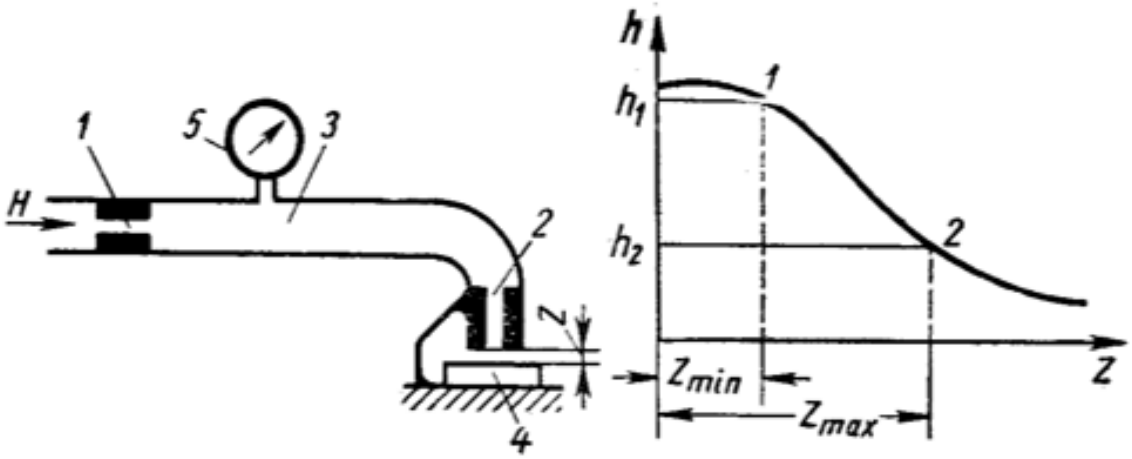
2.1.3 Вимірювальні схеми пневматичних приладів

Витрати повітря у пневматичних приладах в основному вимірюють за допомогою манометрів та ротаметрів, в залежності від чого всі пневматичні схеми поділяються на дві основні групи:

1. Манометричні – реагують на зміну тиску.

2. Ротаметричні – реагують на зміну швидкості повітряного потоку.

В приладах для автоматичного контролю розмірів у машино- та приладобудуванні більш широко використовують пневматичні схеми манометричного типу (рис. 12).



а) б)

Рисунок 12 – Пневматичний прилад манометричного типу:
а – принципова схема; б – характеристика пневматичної вимірювальної схеми

Для побічного визначення витрат повітря через пневматичний перетворювач 2 з площею прохідного перерізу f_2 шляхом вимірювання тиску встановлюють додатковий постійний дросель 1 з площею каналу f_1, який в пневматичних приладах називають вхідним соплом.

Стиснене повітря під постійним робочим тиском H через вхідне сопло 1 надходить у вимірювальну камеру 3 і далі через кільцевий зазор, утворений торцем вимірювального сопла 2 і поверхнею контрольованої деталі 4, витікає в атмосферу. В залежності від величини зазору z в камері 3 встановлюється вимірювальний тиск h, який при сталих робочому тиску H і площі вхідного сопла f_1 є мірою витрат повітря через перетворювач, відповідно і мірою контрольованої лінійної величини z.

Як вимірювач тиску h використовуються рідинні або пружинні манометри 5, шкала яких проградуйована в лінійних величинах. Такі манометри мають пристрої для видачі сигналів-команд.

Точне визначення залежності $h=f(z)$ є надто складним, тому для практичного аналізу пневматичних вимірювальних схем ця залежність визначається наближено і графічно представлена на рисунку 12, б. Її крутизна (тангенс кута нахилу) характеризує передаточне відношення вимірювальної схеми:

$$K_z = \frac{dh}{dz}. \tag{3}$$

Наближена залежність вимірювального тиску h від зазору z має вигляд:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{f_1}{f_2} \right)}, \tag{4}$$

де μ_1 і μ_2 – коефіцієнти витікання через відповідні сопла;

f_1 і f_2 – площі отворів відповідних сопел.

Як правило для роботи пневматичних приладів використовують прямолінійну ділянку характеристики, обмежену точками 1-2, на якій передаточне відношення максимальне і практично стале. Відрізок $\Delta Z = Z_{\max} - Z_{\min}$ визначає межі вимірювання пневматичної вимірювальної схеми.

Більш досконалою схемою вимірювання є диференціальна схема (рис. 13), яка складається з двох ланок, кожна з яких відповідає звичайній схемі (рис. 12, а).

В одній ланці, яка складається з вхідного сопла f_1 і пневматичного перетворювача П, який сприймає зміну розмірів деталі 1, витрати визначаються вимірювальним тиском h_1, друга ланка, утворена вхідним соплом f_1 і соплом 3 з попередньо встановленим зазором Z_{const}. Ця ланка як правило називається ланкою протитиску. Диференціальна схема, для якої характерне порівняння двох тисків h_1 і h_2, менше чутлива до коливань робочого тиску.

Як вимірювач різниці тисків 2 застосовують рідинні, сильфонні, мембранні диференціальні манометри, які реагують на різницю $\Delta h = h_1 - h_2$ в

двох ланках системи.

За аналогією до електричних вимірювань така схема є пневматичним неврівноваженим мостом, до однієї діагоналі якого прикладено різницю тисків $H=(H+P_a)-P_a$ (P_a – атмосферний тиск), а до іншої під'єднано вимірювач тиску.

Диференціальна схема може бути використана також і для вимірювання різниці розмірів двох деталей. В цьому випадку замість вузла протитиску встановлюється другий пневматичний перетворювач.

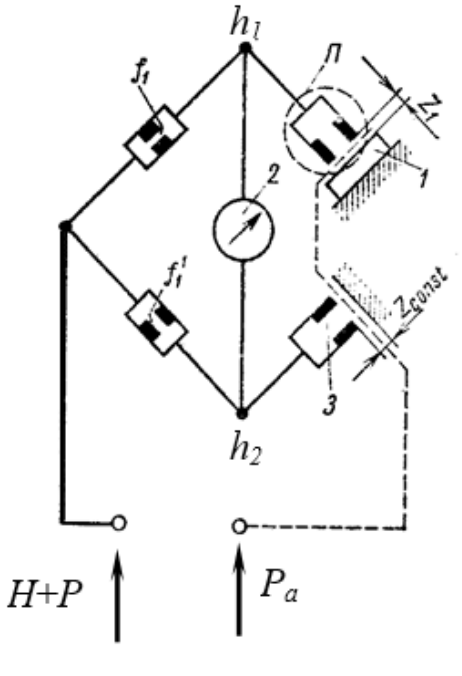


Рисунок 13 – Диференціальна вимірювальна схема пневматичного приладу

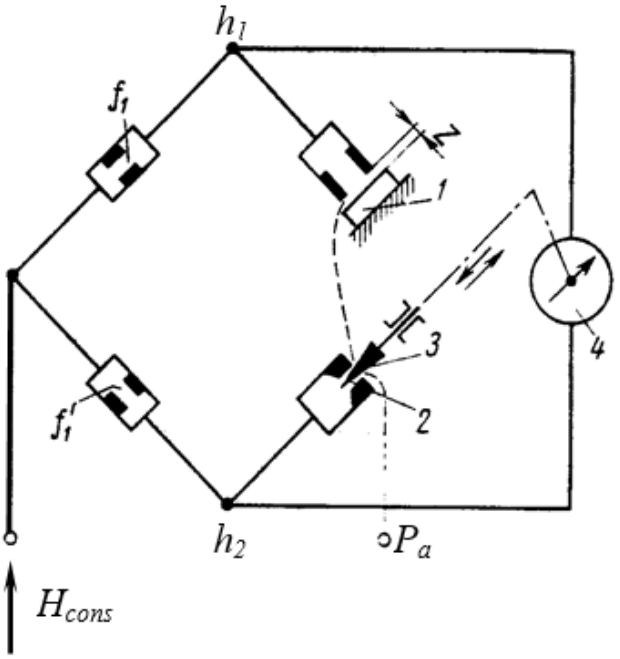


Рисунок 14 – Компенсаційна вимірювальна схема пневматичного приладу

При рівності прохідних перерізів вхідних сопел f_1 і f_1', а також співпаданні форми і розмірів вихідних перерізів обох ланок диференціальної системи, отримаємо:

$$|\varepsilon| = \frac{dh}{\delta h} = \frac{dh}{H} \cdot \frac{\Delta h}{\delta h}, \qquad (5)$$

де ε – відносна похибка, викликана коливаннями робочого тиску H;

dh – похибка вимірювального тиску, викликана похибкою робочого тиску;

δh – межа вимірювання, виражена в одиницях тиску;

dH – похибка робочого тиску (похибка стабілізатора).

З чого слідує, що $\varepsilon=0$ при $\Delta h=0$, тобто при рівності тисків в обох ланках диференціальної схеми, і що величина ε змінюється пропорційно величині Δh, досягаючи максимуму при найбільшому і найменшому вимірювальних зазорах, якщо величина протитиску відповідає середньому значенню вимірюваного тиску.

Умова $\Delta h=0$ реалізується в компенсаційній вимірювальній схемі (рис. 14). Ця схема є пневматичним мостом, який самостійно балансується. Зазор z залежить від величини контрольованої деталі 1 і визначає вимірювальний тиск h_1. Величина h_2 визначається кільцевим зазором між соплом 2 і конічною голкою 3. Конструкція показуючого приладу виконана так, що при наявності різниці тисків h_1 і h_2 чутливий елемент (мембрана) приладу 4 переміщує конічну голку, і тим самим змінює тиск h_2 до настання рівності $h_1=h_2$. Положення конічної голки відносно сопла є мірою вимірювання контрольованої деталі.

2.1.4 Вибір параметрів вимірювальних схем за заданими метрологічними характеристиками

Для цілей практичного розрахунку пневматичних вимірювальних схем використовують експериментальні дані, що представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики пневматичних вимірювальних схем з вимірювальним соплом d_2=2мм

Діаметр отвору вхідного сопла, мм	Робочий тиск, н/м^2×10^5	Прямолінійна ділянка характе-ристики, мм	Вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки, мм	Передаточне відношення, н/м^2/мм×10^5
0,60	0,5	0,020	0,040	8,2
	1,0	0,024	0,042	13,9
	1,5	0,040	0,050	18,9
	2,0	0,044	0,052	21,0
0,70	0,5	0,024	0,042	6,5
	1,0	0,044	0,052	10,1
	1,5	0,046	0,067	12,1
	2,0	0,050	0,070	15,1
0,80	0,5	0,040	0,050	4,3
	1,0	0,046	0,073	7,0
	1,5	0,050	0,085	9,7
	2,0	0,060	0,090	11,6
1,00	0,5	0,080	0,090	2,2
	1,0	0,080	0,120	4,3
	1,5	0,090	0,145	5,9
	2,0	0,100	0,150	7,4
1,20	0,5	0,080	0,120	1,5
	1,0	0,104	0,162	2,6
	1,5	0,110	0,215	3,8
	2,0	0,100	0,190	4,7
1,50	0,5	0,100	0,215	0,7
	1,0	0,100	0,220	1,4
	1,5	0,130	0,245	2,0
	2,0	0,170	0,275	2,6

Параметрами вимірювальної схеми є діаметр отвору вхідного сопла d_1, діаметр отвору вимірювального сопла d_2, робочий тиск H, діапазон вимірювальних зазорів z. Основними метрологічними характеристиками вимірювальної пневматичної схеми, які задаються при проектуванні пневматичного вимірювального приладу, є передаточне відношення $K_z=dh/dz$, межі вимірювання Δz, вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки характеристики $h(z)$, степінь нелінійності характеристики $h(z)$ на заданому проміжку вимірювання.

Вибір параметрів пневматичної вимірювальної схеми починають з вибору діаметра отвору вимірювального сопла. На основі експлуатації, технології виготовлення, метрологічних та економічних міркувань рекомендується вимірювальні сопла для перетворювачів з плоскою заслінкою виконувати з діаметром d_2=2 мм. В таблиці 2 приведені основні характеристики пневматичних вимірювальних схем з вимірювальним соплом d_2=2 мм.

Приведені експериментальні дані (таблиця 2) дійсні як при одному вимірювальному соплі, так і при великій кількості однакових вимірювальних сопел, з рівномірним розподілом вимірювального зазору між ними. В цьому випадку вимірювальний зазор буде дорівнювати сумі всіх зазорів вимірювальних сопел. Степінь нелінійності прямолінійної ділянки характеристики не перевищує 1%.

2.1.5 Пневматичні диференціальні прилади

У пневматичних приладах диференціальної системи використовуються диференціальні манометри, де як пружні чутливі елементи застосовані сильфони. На рисунку 15 наведено принципову схему такого приладу.

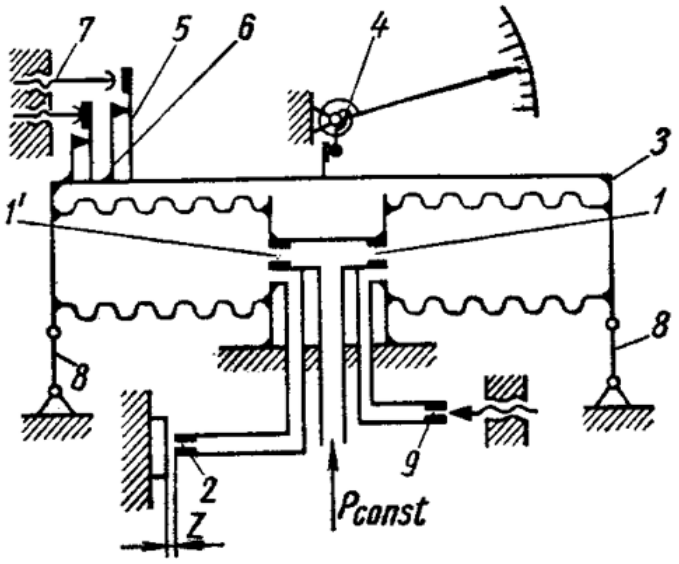


Рисунок 15 – Принципова схема сильфонного диференціального пневматичного вимірювального приладу

Стиснене повітря із пневмомережі, пройшовши через блок фільтра і стабілізатора, під постійним тиском надходить через вхідні сопла 1 і 1′ в порожнини сильфонів.

З лівого сильфона повітря через кільцевий зазор z, утворений торцем вимірювального сопла 2 і поверхнею контрольованої деталі, виходить в атмосферу. В цьому сильфоні створюється вимірювальний тиск h, величина якого залежить від розміру контрольованої деталі. З правого сильфона повітря витікає в атмосферу через вузол протитиску 9, а в порожнині сильфона створюється постійний тиск h_2. Вільні кінці сильфонів жорстко зв'язані стяжкою 3, яка підвішена на плоских пружинах 8.

Положення рухомої системи приладу визначається різницею вимірювального тиску h і деякого сталого протитиску h_2. Переміщення рухомої системи вимірюється за допомогою механізму 4, який складається із стрілки зі шкалою і важільно-зубчастої передачі від сильфонів до стрілки.

На рухомій системі приладу за допомогою плоских пружин 5 закріплено рухомі електричні контакти. Для попереднього натягу пружин з метою необхідного зусилля замикання контактів служать упори 6. Гвинти 7 з нерухомими контактами служать для настроювання спрацьовування електричних контактів при заданому розмірі контрольованої деталі. В існуючих приладах кількість контактів (вихідних команд керування) досягає восьми.

При диференціальних вимірюваннях замість вузла протитиску встановлюється друге вимірювальне сопло, аналогічне соплу 2.

У тому випадку, коли прилад проектується також і для контролю відхилень від правильної геометричної форми і взаємного розташування поверхонь, наприклад, овальності, биття, перпендикулярності торця і т.д., він комплектується плаваючим контактом.

Принципова пневматична схема диференціального пневматичного вимірювального приладу зображена на рисунку 16.

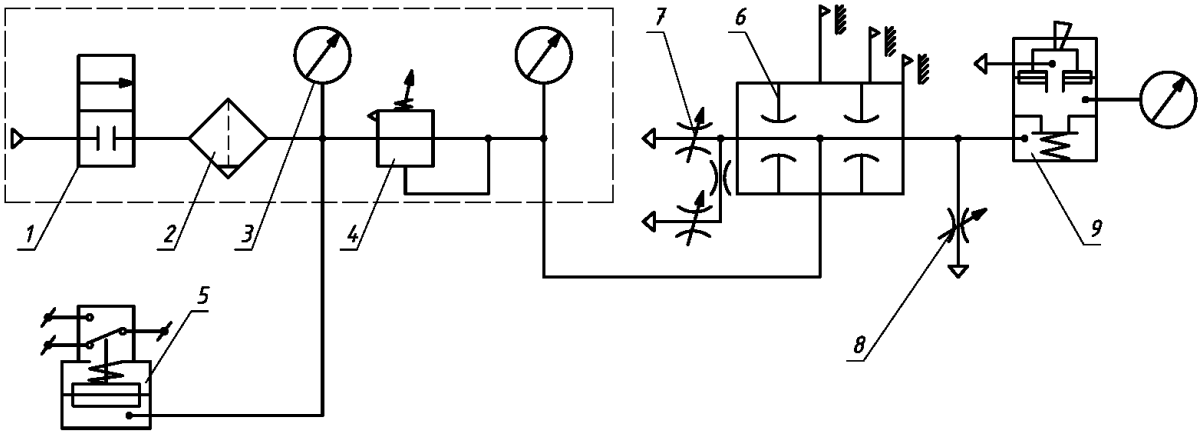


Рисунок 16 – Принципова пневматична схема сильфонного диференціального пневматичного вимірювального приладу: I – вузол підготовки повітря; 1 – зворотній клапан; 2 – фільтр повітряно-крапельний; 3 – манометри; 4 – регульований редуктор; 5 – пневмоелектрореле; 6 – диференціальний сильфонний манометр з командним пристроєм; 7 – сопло протитиску (регульований дросель); 8 – вимірювальне сопло (регульований дросель); 9 – клапан

Настроювання приладу проводиться за допомогою зразкових деталей, причому при настроюванні контактів, регулюючи вузол протитиску, досягають такого положення рухомої системи, при якому стрілка приладу розташовується симетрично відносно нуля шкали при послідовному встановленні на вимірювальну позицію максимальної та мінімальної зразкової деталі. При правильному виборі параметрів схеми і пружних елементів похибка диференціальних сильфонних приладів не перевищує десятих часток мікрометра.

2.1.6 Розрахунок пневматичних диференціальних схем

Вихідні дані до розрахунку:

Висота контрольованої деталі;

Кількість вихідних команд керування;

Діапазон вимірювання – Δ;

Ціна поділки лімбу налаштовування $i_к$;

Похибка спрацьовування δ_z (%);

Передаточне відношення важільного механізму пневматичного перетворювача $K_в$;

Робочий тиск H;

Довжина (інтервал) ділення шкали a=1мм;

Порядок розрахунку

1. Виходячи зі стандартизованих даних і враховуючи рекомендації приймаємо вимірювальний перетворювач з плоскою заслінкою (рис. 11, а, б) і вибираємо діаметр отвору вимірювального сопла d_2=2 мм.

2. Оскільки прямолінійна ділянка характеристики вимірювальної системи згідно таблиці 2 обмежена значенням 0,17 мм для забезпечення степені нелінійності 1 % слід перевірити співвідношення:

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в \le 0{,}17 \ \ мм, \qquad (6)$$

де $K_в$ – передаточне відношення важільного механізму пневматичного перетворювача.

Якщо умова (6) не виконується, необхідно відкоректувати значення $K_в$, тобто прийняти інше значення з ряду: 1:1, 1:2, 1:4, 1:5. Значення $K_в$ вибираємо якомога більшим.

3. Характеристики пневматичної вимірювальної системи вибираємо за експериментальними даними з таблиці 2:

– діаметр отвору вхідного сопла d_1;

– робочий тиск H;

– прямолінійна ділянка характеристики ΔZ ;

– вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки $Z_{ср}$;

– передаточне відношення пневматичної вимірювальної системи, утвореної соплами 1 та 2 K_z.

4. З принципової схеми сильфонного диференціального пневматичного

вимірювального приладу (рис. 15) слідує, що його загальне передаточне відношення дорівнює:

$$K_{\Sigma} = K_{в} K_{z} K_{м} K_{с}, \tag{7}$$

де $K_{в}$ – передаточне відношення важільного механізму;

K_{z} – передаточне відношення пневматичної системи;

$K_{м}$ – передаточне відношення механізму передачі від сильфона на стрілку;

$K_{с}$ – передаточне відношення сильфонів.

Для забезпечення заданих або вибраних параметрів шкали загальне передаточне відношення приладу повинно дорівнювати:

$$K_{\Sigma} = \frac{a}{i_{\Sigma}}, \tag{8}$$

де a – задана довжина ділення шкали;

i_{Σ} – вибрана ціна ділення шкали.

Передаточне відношення на електричні контакти $K_{с} \cdot K_{z}$ для сильфонних приладів мікронної точності, як правило приймають у межах 20-50.

Тоді можна визначити передаточне відношення сильфонів:

$$K_{с} = \frac{k_{с} \cdot k_{z}}{k_{z}}. \tag{9}$$

5. Перевірка умов спрацьовування контактів після заданої кількості їх замикання здійснюється за допомогою нерівності:

$$\frac{\Delta_{сп}}{K_{z} K_{с}} < \Delta_{z}, \tag{10}$$

де $\Delta_{сп}$ – механічне та ерозійне спрацьовування контактів, величина якого залежить від матеріалу контактів та кількості їх замикань і вибирається з таблиці 3;

Δ_{z} – допустима похибка вимірювання, яка визначається відповідно до заданої похибки спрацьовування δ_{z} :

$$\Delta_{z} = \frac{\delta_{z} Z_{ср}}{100}. \tag{11}$$

Якщо умова спрацьовування контактів не забезпечується, слід змінити передаточне відношення $K_{с} \cdot K_{z}$.

Таблиця 3 – Величини спрацьовування контактів

Матеріал контактів	Спрацьовунння після 25000 замикань в мкм
Вольфрам	1-2
Срібло Ср. 99,9	5-7
Платина Пл П-1	5-7
Вольфраморенієвий сплав ВР-20	0,5-1
Палладій з іридієм ПДИ-18	4-6

6. Визначаємо передаточне відношення механізму передачі від сильфона на стрілку:

$$K_м = \frac{k_\Sigma}{k_c \cdot k_z}. \qquad (12)$$

7. Визначаємо передаточне відношення на контакти з урахуванням передаточного відношення важеля $k_в$:

$$K_к = k_в k_z k_c. \qquad (13)$$

8. З метою зменшення похибки показів до заданої величини необхідно збільшувати ефективну площу сильфонів так, щоб зусилля P_c, яке створюють сильфони при зміні вимірювального зазору на величину допустимої похибки Δ_z, було рівним або більшим від сумарного додаткового зусилля:

$$P_c \geq P_м + P_к, \qquad (14)$$

де $P_м = 0{,}3\ H$ – амплітуда коливань зусилля притискання механізму передачі руху від сильфонів на стрілку;

$P_к$ – зусилля з боку пружин електроконтактного пристрою , яке визначається залежністю:

$$P_к = n \cdot P + 0{,}5q \cdot l \cdot n, \qquad (15)$$

де n – число контактів, яке повинно дорівнювати кількості команд керування;

P – зусилля попереднього притискання пружини до обмежувальних планок, яке забезпечує надійне замикання контактів і приймається з таблиці 4 залежно від матеріалу контактів;

q=0,02 Н/мм – жорсткість пружини, пов’язаної з контактом;

$l = \Delta \cdot K_к$ – величина переміщення контакту в замкнутому стані.

Таблиця 4 – Зусилля замикання контактів

Матеріал контактів	Рекомендоване зусилля замикання в Н
Вольфрам В4	0,1-0,15
Срібло СР. 99,9	0,05-0,08
Платина Пл П1	0,03-0,05
Вольфраморенієвий сплав ВР-20	0,1-0,15
Палладій з іридієм ПД-18	0,07-0,1

9. Визначаємо ефективну площу сильфонів:

$$F_e \geq \frac{P_c}{K_z \Delta_z}. \tag{16}$$

10. Знаходимо ефективний діаметр сильфонів:

$$D = 2\sqrt{\frac{F_e}{\pi}}. \tag{17}$$

11. Визначаємо жорсткість сильфонів та їх пружної підвіски:

$$q_c \geq \frac{F_e K_z}{K_z K_c}. \tag{18}$$

12. Уточнюємо загальне передаточне відношення приладу за формулою (7).

13. Для зменшення похибки від коливання робочого тиску діаметри вхідних сопел обох ланок приймаємо рівними, а також приймаємо рівними діаметри робочого сопла та сопла протитиску.

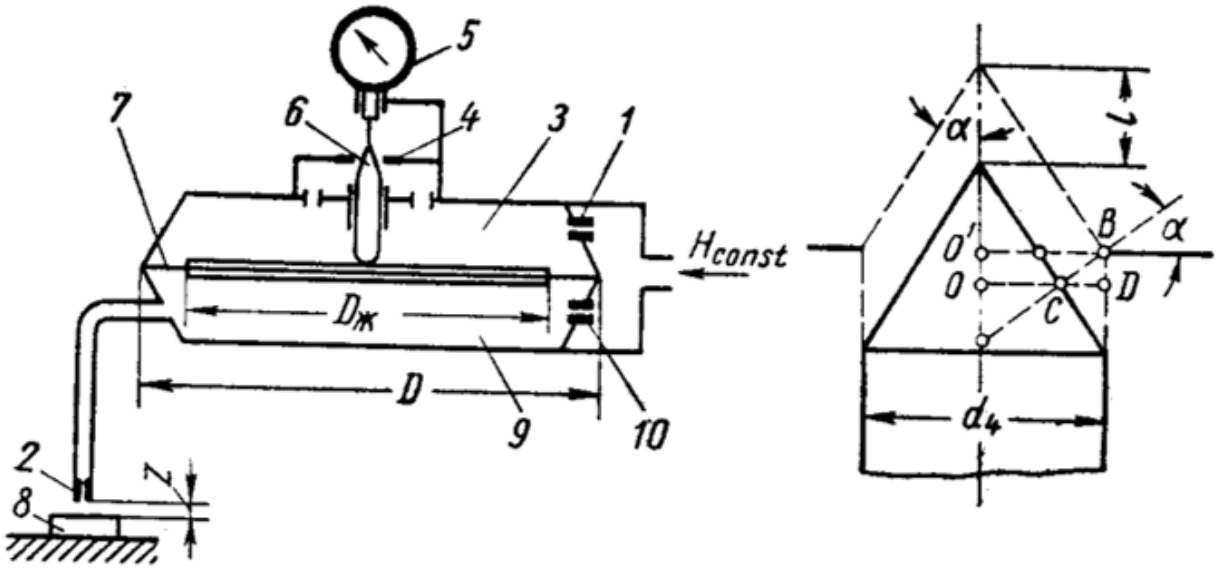
14. Розраховуємо механізм лімбу налаштовування контактів.

Приймаємо, що лімб налаштовування контактів розбито на 10 поділок. Тоді крок різьби лімбу налаштовування буде:

$$S = 10 \cdot i_k \mathrm{K_в K_z K_c} \times 10^{-3},\ \text{мм}. \tag{19}$$

2.1.7 Компенсаційні пневматичні вимірювальні прилади

На рисунку 17 наведено принципову схему приладу, побудованого за компенсаційною схемою. Стиснене повітря під постійним тиском *H* надходить через вхідні сопла 1 і 10 у вимірювальну камеру 9 і компенсаційну камеру 3. Із вимірювальної камери повітря виходить в атмосферу через вимірювальний зазор z між торцем вимірювального сопла 2 і поверхнею контрольованої деталі 8.



а) б)

Рисунок 17 – Принципова схема компенсаційного пневматичного приладу (а) і геометрична схема каналу витікання компенсаційної ланки приладу (б)

Із компенсаційної камери повітря виходить в атмосферу через кільцеву щілину між поверхнею конічної голки 6 і сопла 4. Мембрана 7 знаходиться у спокої тільки тоді, коли тиск у вимірювальній камері дорівнює тиску у компенсаційній камері. При зміні зазору вимірювальний тиск також змінюється і рівновага мембрани порушується.

Переміщуючись, мембрана змінює положення голки 6 відносно сопла 4 таким чином, що тиск у компенсаційній камері знову стає рівним вимірювальному тиску. Переміщення голки 6, яке відраховується за шкалою мікроміра 5, є мірою зміни розміру контрольованої деталі 8.

Отримання електричних команд здійснюється за допомогою встановлення електрифікованих мікромірів 5, або застосуванням електроконтактних перетворювачів як граничних, так і амплітудних, вимірювальні стержні яких конструктивно зв’язуються з переміщенням голки 6. За допомогою компенсаційного приладу можна вимірювати різницю двох розмірів. Для цього необхідно включити в компенсаційну камеру другий пневматичний перетворювач. Конструктивно ці прилади прості, мають високу точність (1-2 мкм), менше інерційні у порівнянні із сильфонними приладами.

Залежність величини переміщення конічної голки 6 від зміни вимірювального зазору визначається з умови компенсації тисків, яка зводиться до рівності відношень площ витікання через сопла компенсаційної та вимірювальної ланок:

$$\frac{f_4}{f_{10}} = \frac{f_2}{f_1},$$

де f_4, f_{10}, f_2, f_1 – площі витікання через відповідні сопла.

Принципова пневматична схема компенсаційного пневматичного вимірювального приладу зображена на рисунку 18.

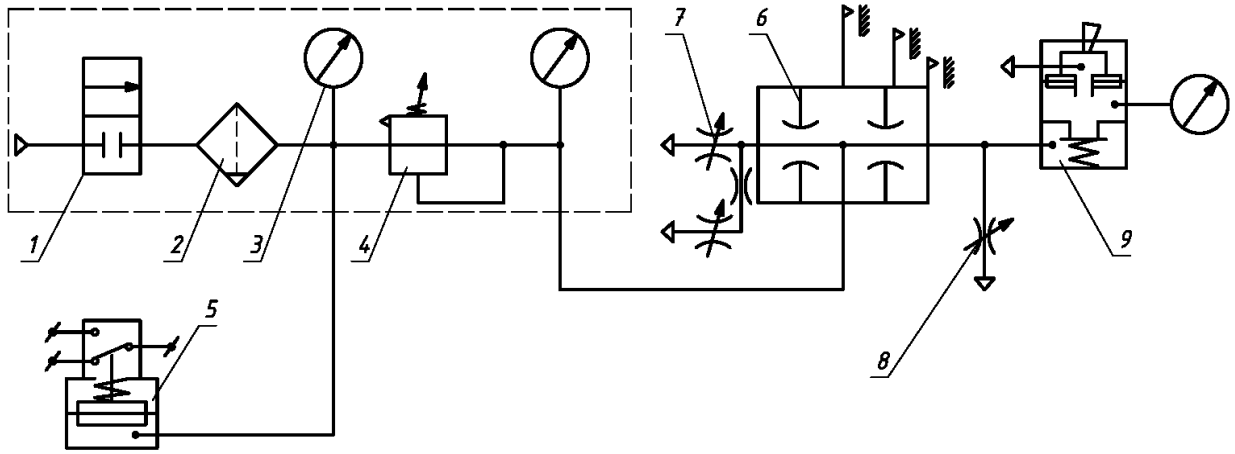


Рисунок 18 – Принципова пневматична схема компенсаційного пневматичного вимірювального приладу: I – вузол підготовки повітря; 1 – зворотній клапан; 2 – фільтр повітряно-крапельний; 3 – манометри; 4 – регульований редуктор; 5 – пневмоелектрореле; 6 –компенсаційний манометр з командним пристроєм; 7 – сопло протитиску (регульований дросель); 8 – вимірювальне сопло (регульований дросель); 9 – клапан

2.1.8 Розрахунок компенсаційних пневматичних вимірювальних приладів

Вихідні дані до розрахунку:

Висота контрольованої деталі;

Кількість вихідних команд керування;

Діапазон вимірювання – Δ;

Ціна поділки лімбу налаштовування $i_к$;

Похибка спрацьовування δ_z (%);

Передаточне відношення важільного механізму пневматичного перетворювача $K_в$;

Робочий тиск H;

Довжина (інтервал) ділення шкали a = 1 мм;

Порядок розрахунку

1. Виходячи із стандартизованих даних і враховуючи рекомендації, приймаємо вимірювальний перетворювач з плоскою заслінкою (рис. 11, а, б) і вибираємо діаметр отвору вимірювального сопла d_2=2 мм.

2. Оскільки прямолінійна ділянка характеристики вимірювальної системи, згідно з таблицею 2, обмежена значенням 0,17 мм для забезпечення степені нелінійності 1 % слід перевірити співвідношення:

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в \le 0{,}17 \ мм, \qquad (20)$$

де $K_в$ – передаточне відношення важільного механізму пневматичного перетворювача.

Якщо умова (20) не виконується, необхідно відкоректувати значення $K_в$, тобто прийняти інше значення з ряду: 1:1, 1:2, 1:4, 1:5. Значення $K_в$ вибираємо якомога більшим.

3. Характеристики пневматичної вимірювальної системи вибираємо за експериментальними даними з таблиці 2:

– діаметр отвору вхідного сопла d_1;

– робочий тиск H;

– прямолінійна ділянка характеристики ΔZ;

– вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки $Z_{ср}$;

– передаточне відношення пневматичної вимірювальної системи, утвореної соплами 1 та 2 K_z.

4. Для забезпечення заданих або вибраних параметрів шкали загальне передаточне відношення приладу повинно дорівнювати:

$$K_\Sigma = \frac{a}{i_\Sigma}, \tag{21}$$

де a – задана довжина ділення шкали;

i_Σ – вибрана ціна ділення шкали.

5. Для найкращого наближення до умов газодинамічної подібності витікання через відповідні сопла обох ланок приладу і, відповідно, зменшення величини впливу коливання робочого тиску на результати вимірювання, діаметри вхідних сопел 1 і 10 приймаємо рівними:

$$d_1 = d_{10}. \tag{22}$$

6. Тоді умова компенсації буде:

$$f_2 = f_4. \tag{23}$$

7. З принципової схеми мембранного компенсаційного пневматичного вимірювального приладу (рис. 17) випливає, що його загальне передаточне відношення дорівнює:

$$K_\Sigma = K_в K_z K_м K_{мб}, \tag{24}$$

де $K_в$ – передаточне відношення важільного механізму;

K_z – передаточне відношення пневматичної системи;

$K_м$ – передаточне відношення мікроміра;

$K_{мб}$ – передаточне відношення мембрани.

Для забезпечення заданих або вибраних параметрів шкали загальне

передаточне відношення приладу повинно відповідати (22).

Передаточне відношення до конічної голки приладу $K_п = K_z K_{мб}$ для мембранних приладів, як правило, приймають рівним 20-50.

8. Тоді можна визначити передаточне відношення мембрани:

$$K_{мб} = \frac{K_z K_{мб}}{K_z} = \frac{K_п}{K_z}. \tag{25}$$

9. Визначаємо половину кута конуса голки 6:

$$\alpha = \arcsin \frac{d_2}{d_4 K_п}, \tag{26}$$

де d_4=1,5 мм.

10. Визначаємо передаточне відношення до конічної голки з врахуванням передаточного відношення важеля $K_в$:

$$K_к = K_в K_z K_{мб}. \tag{27}$$

11. З метою зменшення похибки показів до заданої величини необхідно, щоб зусилля мембрани було більшим або рівним від сумарного додаткового зусилля:

$$P_{мб} \geq P_м + P_к. \tag{28}$$

Зусилля притискання вимірювального стержня мікроміра до голки:

$$P_м = (3 \div 4)\frac{\pi d^2}{4} \cdot H \tag{29}$$

Це зусилля визначається з умови, щоб воно було в 3-4 рази більше за зусилля, яке виштовхує голку 3 компенсаційної камери максимально можливим (робочим) тиском H, а $P_к$ – зусилля з боку контактних пружин, якщо вони включені в кінематичний ланцюг приладу, які визначаються згідно з (15).

12. Ефективну площу мембрани знаходимо з умови, щоб похибка вимірювання, викликана коливаннями вимірювального зусилля мікроміра і прикладених додаткових зусиль зі сторони контактних пружин не перевищувала заданої:

$$F_e \geq \frac{P_{мб}}{K_z \Delta_z}, \tag{30}$$

де Δ_z визначаємо згідно з (11).

13. Визначаємо діаметр мембрани D та жорсткого центра $D_ж$:

$$D \geq 1{,}25\sqrt{\frac{P_{мб}}{K_z \Delta_z}}; \qquad D_ж = 0{,}8D. \tag{31}$$

14. Уточнюємо загальне передаточне відношення приладу:

$$K_\Sigma = K_в K_z K_м K_{мб}.$$

15. Розраховуємо механізм лімбу настроювання контактів.

Приймаємо, що лімб настроювання контактів розбито на 10 поділок. Тоді крок різьби лімбу настроювання буде:

$$S = 10 \cdot i_k \mathrm{K_в K_z K_{мб}} \times 10^{-3}, \text{ мм}. \tag{32}$$

2.1.9 Особливості вибору параметрів вимірювальних схем з декількома вимірювальними соплами (комбінованим соплом)

1. Приймаємо d_2=2мм, кількість вимірювальних сопел – 2.
2. З рисунка 18 $Z=Z_1+Z_2=Z_{ср}$.
3. Щоб працювати в межах прямолінійних ділянок характеристик для d_2=2мм необхідно при користуванні таблицею 2 враховувати, щоб $1 \leq d_1 \leq 1{,}5$ і $Z_{ср}$=0,12 ÷ 0,14 мм, а значення H вибирати.

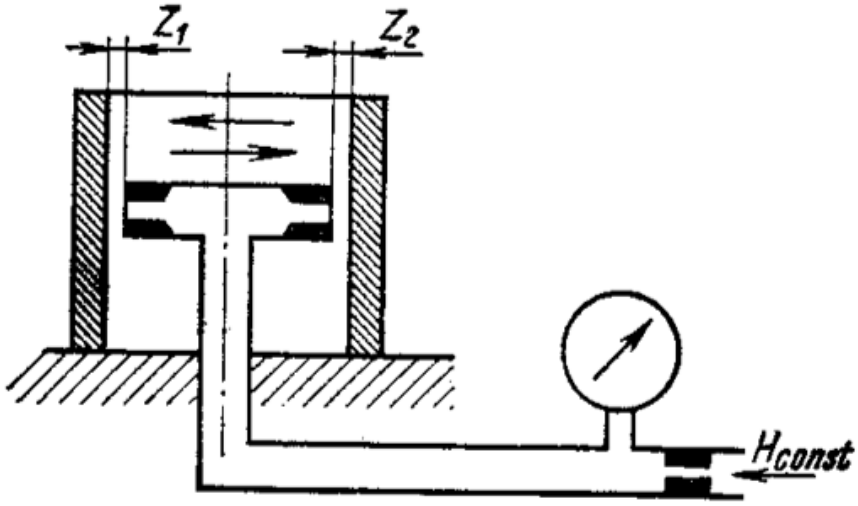


Рисунок 18 – Схема контролю отвору пневматичною пробкою (комбінованого сопла)

В усьому іншому розрахунок такий самий, як для диференціальних чи компенсаційних приладів.

2.2 Індуктивні перетворювачі

2.2.1 Принцип дії

В індуктивних приладах використовується властивість котушки змінювати свій реактивний опір при зміні деяких її параметрів, що визначають величину індуктивності *L*.

Для отримання якомога більшої індуктивності котушка, як правило, виконується з магнітопроводом із феромагнітного матеріалу (рис. 19). Один з елементів виконується рухомим (якір) і його положення відносно нерухомої частини магнітопровода буде визначати величину зміни магнітного опору кола, а відповідно, й індуктивності котушки.

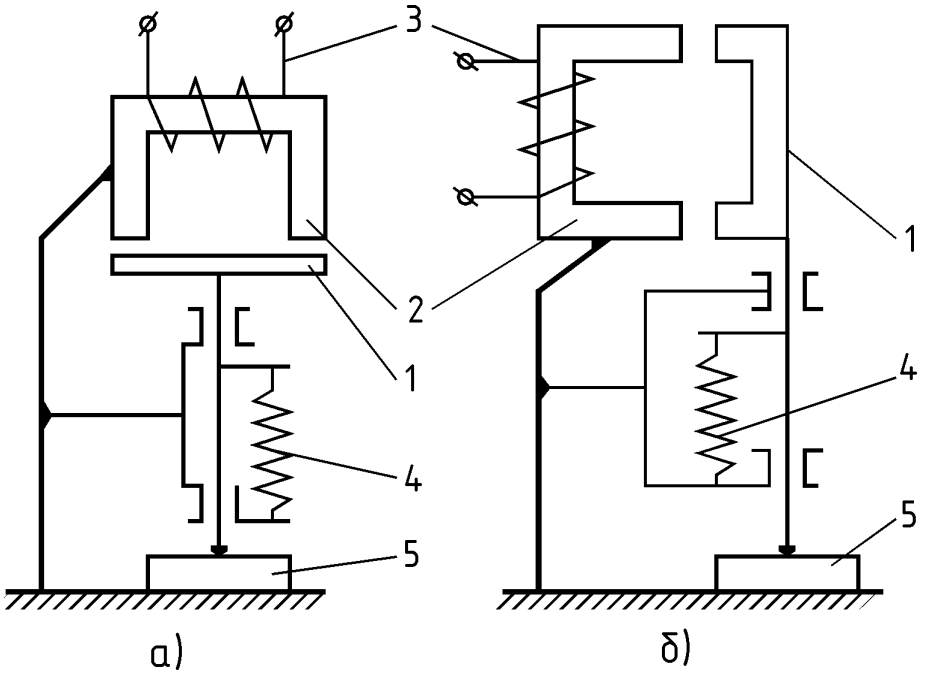


Рисунок 19 – Принципові схеми звичайних індуктивних перетворювачів: 1 – якір перетворювача; 2 – магнітопровід; 3 – котушка перетворювача; 4 – пружина, що створює вимірювальне зусилля; 5 – деталь, що контролюється; а) перетворювач, в якого вимірювана величина викликає зміну зазору δ; б) перетворювач, в якого вимірювана величина викликає зміну площі повітряного зазору

Зміна індуктивного опору котушки веде до відповідної зміни її повного опору *Z*. Таким чином, якщо пов’язати переміщення якоря з вимірюваною величиною δ при *U=const*, виникає функціональна залежність між δ і електричним параметром *L*:

$$L = f(\delta). \tag{33}$$

Пристрій, який перетворює лінійне переміщення в електричний параметр за допомогою вищеописаної котушки, називається індуктивним перетворювачем.

Індуктивний прилад може бути представлений принциповою схемою, показаною на рисунку 20.

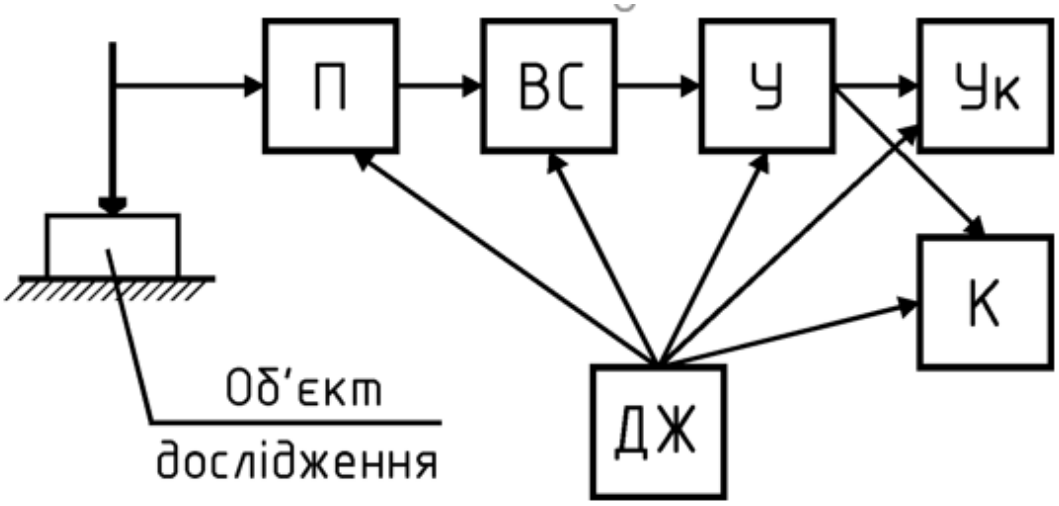


Рисунок 20 – Блок-схема індуктивного приладу: П – індуктивний перетворювач; ВС – вимірювальна схема, яка служить для перетворення сигналу перетворювача в зручний для вимірювання інший електричний параметр (напруга, сила струму); У – електронний підсилювач; Ук – вказівна система; К – пристрій для подачі команд; ДЖ – джерело живлення

Вираз для визначення індуктивності котушки перетворювача має вигляд:

$$L = \frac{W^2}{\frac{\delta_0}{\mu_0 s_0} + \frac{\delta_1}{\mu_1 s_1}}, \qquad (34)$$

де W – кількість витків котушки;

δ_0, s_0 – довжина і площа повітряного зазору між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу;

δ_1, s_1 – довжина магнітних ліній і площа перерізу магнітопроводу;

μ_0 і μ_1 – відповідно магнітна проникність повітря і матеріалу магнітопроводу.

Зміну індуктивності L можна здійснити шляхом зміни довжини δ_0 або площі s_0 повітряного зазору і довжини δ_1, площі s_1 чи магнітної проникності μ_0 осердя.

В індуктивних перетворювачах для лінійних вимірювань зміна індуктивності досягається за допомогою зміни величини δ_0 (рис. 19, а) або площі s_0 (рис. 19, б).

Характеристика індуктивного перетворювача із змінним зазором $L = f(\delta)$ наведена на рисунку 21, а, а перетворювача із змінною площею – на рисунку 21, б.

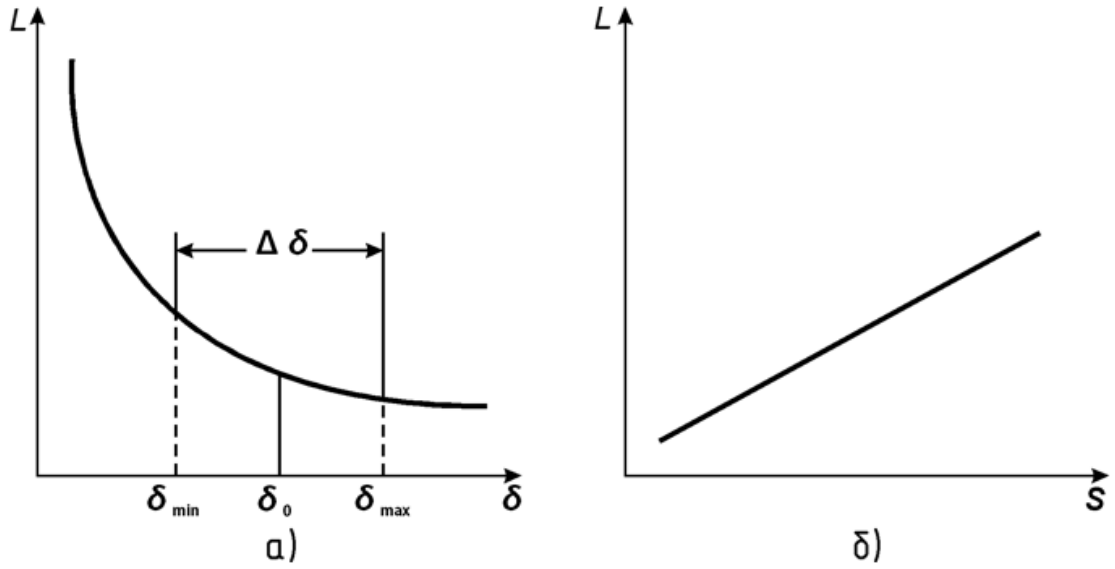


Рисунок 21 – Характеристики індуктивних перетворювачів:
а) характеристика перетворювача із змінним зазором $L = f(\delta)$;
б) характеристика перетворювача із змінною площею $L = f(s)$

З кривої (рис. 21, а) випливає, що характеристика перетворювачів із змінним зазором нелінійна, але в той же час дозволяє отримати високочутливу вимірювальну систему. Для підвищення чутливості величину повітряного зазору потрібно зменшувати.

Для того, щоб з заданим ступенем точності можна було вважати чутливість перетворювача величиною постійною, необхідно робочу ділянку $\Delta\delta = \delta_{\max} - \delta_{\min}$ обмежити допустимими зазорами $\delta_{\max}$ і $\delta_{\min}$, мінімальна величина повітряного зазору повинна бути тим більша, чим більший діапазон зміни зазору в процесі вимірювання.

Чим менше відношення $\frac{\Delta\delta}{\delta_0}$, тим менша величина нелінійності характеристики перетворювача. Для того щоб степінь нелінійності перетворювача не перевищувала, наприклад, 10%, необхідно, щоб $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = 0{,}1 \div 0{,}2.$

З метою отримання більш лінійної залежності, не зменшуючи величини $\Delta\delta$, використовують диференціальні індуктивні перетворювачі, принцип дії яких показано на рисунку 22, (а). Перетворювач має два магнітні кола зі спільним якорем. Під дією вимірюваної величини обидва зазори змінюються однаково, але з різними знаками. Такий перетворювач називають диференціальним.

При відповідному включенні обох котушок у вимірювальну схему (наприклад, в сусідні плечі мостової схеми) диференційний перетворювач має приблизно в 2 рази більшу чутливість у порівнянні з недиференційним, менше чутливий до коливань навколишньої температури, напруги живлення і її частоти.

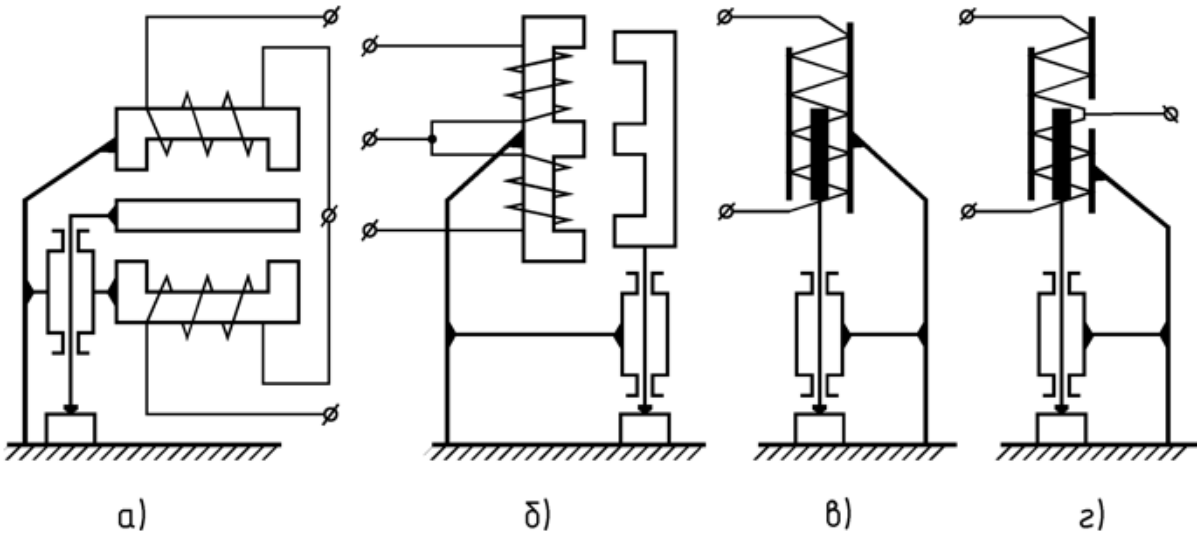


Рисунок 22 – Принципові схеми індуктивних перетворювачів:
а) диференціальний перетворювач із змінним зазором; б) диференціальний перетворювач із змінною площею; в) соленоїдний перетворювач;
г) диференційний соленоїдний перетворювач

Існуючі конструкції індуктивних диференціальних перетворювачів при величинах $\frac{\Delta\delta}{\delta_0}=0{,}15\div 0{,}2$ дозволяють отримати величину нелінійності, що не перевищує 1%.

Індуктивні перетворювачі із змінною площею повітряного зазору мають лінійну характеристику $L=f(s)$, але невисоку чутливість, використовуються для вимірювання великих переміщень. Диференціальна схема перетворювачів даного типу (рис. 22, б) має аналогічні переваги.

Для вимірювання переміщень у декілька десятків міліметрів використовують перетворювачі з розімкнутим магнітним колом, так звані перетворювачі соленоїдного типу.

На рисунку 22, (г), в наведені схеми диференціального і недиференціального перетворювачів соленоїдного типу.

Перетворювач є котушкою, всередині якої розміщено феромагнітне осердя (якір). При входженні якоря в середину котушки індуктивність останньої змінюється приблизно пропорційно введеній в котушку масі якоря:

$$L=\frac{W^2}{l_k}\mu q l, \tag{35}$$

де W, l_k, q – кількість витків, довжина і поперечний переріз котушки;

l – величина входження якоря;

μ – магнітна проникність матеріалу якоря.

Для підвищення чутливості перетворювача котушку поміщають у феромагнітний кожух. Характеристика соленоїдного перетворювача лінійна,

але великою мірою залежить від якості намотування котушок. Котушки перетворювача по всій своїй довжині повинні бути суворо ідентичні, як по числу витків, так і за геометричними розмірами.

Котушки перетворювача зазвичай живляться стабілізованою напругою порядку 10-30 В. Чутливість перетворювача буде рости із збільшенням частоти напруги живлення. В існуючих високоточних приладах використовують частоту напруги живлення 3-10 кГц. Більшість приладів працює на частоті 50 Гц.

2.2.2 Вимірювальні схеми індуктивних приладів

Вимірювальна схема індуктивного приладу повинна забезпечувати:

1) отримання можливої більш лінійної залежності струму або напруги на виході системи від зміни опору котушок перетворювача;

2) мінімальну похибку від зміни напруги живлення і частоти, температури навколишнього середовища, впливу зовнішніх магнітних і електричних полів. Основними вимірювальними схемами індуктивних приладів для лінійних розмірів є симетричні мостові схеми змінного струму, що працюють в режимі відхилень і в рівноважному режимі.

Найбільшого поширення набули схеми першого типу. Схема, що працює в режимі відхилень, показана на рисунку 23, (а).

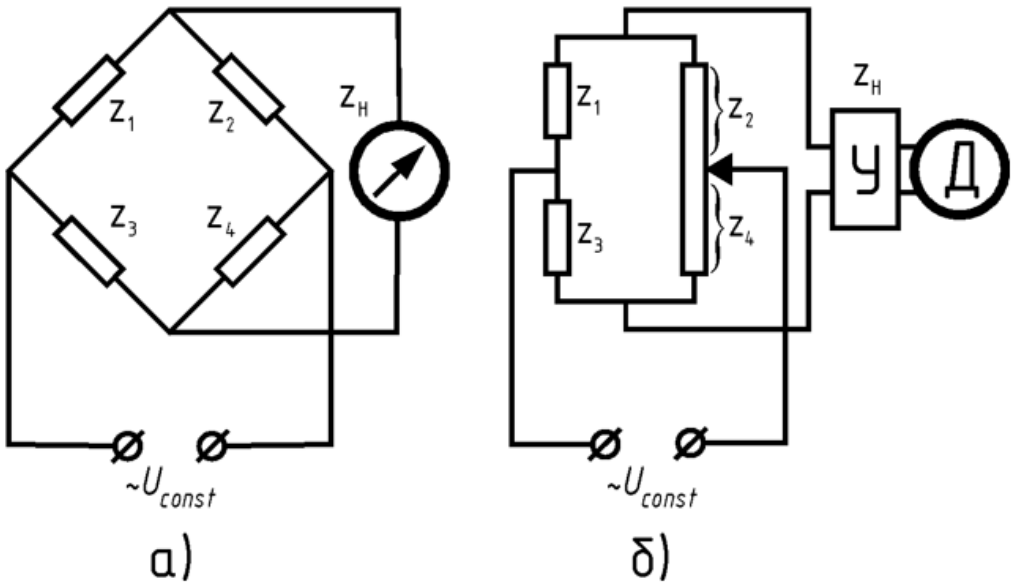


Рисунок 23 – Вимірювальні схеми індуктивних приладів:
а) схема, яка працює в режимі відхилень; б) схема, яка працює в рівноважному режимі

Симетрію моста можна здійснити двояко: $z_1 = z_2$ і $z_{2''} = z_4$, де z_1 і z_3 – опори котушок диференційного перетворювача, а також $z_1 = z_2$ і $z_3 = z_4$, де z_1 і z_2 – опори котушок перетворювача.

Схеми, що працюють у рівноважному режимі (рис. 23, б), використовують в індуктивних самописцях і рідше в приладах активного контролю.

Опори $z_1 = z_3$ є опорами індуктивного диференціального перетворювача. Величина напруги розбалансу моста подається на підсилювач У, а потім на виконавчий механізм (електродвигун) Д, який переміщує повзунок реохорда $z_2 + z_4$ до тих пір, поки на вихідній діагоналі моста напруга не стане рівною нулю. Положення повзунка реохорда визначає розмір контрольованої деталі.

При побудові високоточних індуктивних приладів з метою підвищення чутливості між вимірювальним мостом і вихідним показуючим приладом встановлюють електронний підсилювач. В цьому випадку опір навантаження R_n (вхідний опір електронного підсилювача) стає досить великим.

Як показуючі пристрої в індуктивних приладах для лінійних вимірювань в основному використовують мікроамперметри і мілівольтметри магнітоелектричної системи, які через напівпровідниковий випрямляч зв'язуються з вимірювальною діагоналлю моста.

Для отримання вихідних команд керування в індуктивних вимірювальних приладах після електронного підсилювача підключають набір електронних порогових пристроїв (компараторів) К, кількість яких дорівнює кількості вихідних команд управління. Кожен пороговий пристрій регулюється електронними регуляторами на певний рівень спрацьовування від вихідного сигналу підсилювача. Рівень спрацьовування порогового пристрою візуально контролюється за шкалою показуючого пристрою.

2.2.3 Розрахунок індуктивних перетворювачів

Вихідні дані до розрахунку:

Розміри контрольованої деталі;

Кількість вихідних команд керування;

Діапазон вимірювання – Δ;

Похибка спрацьовування δ_z (%);

Передаточне відношення важільного механізму перетворювача $K_в$;

Степінь нелінійності характеристики;

Характер переміщення вимірювального штока в процесі вимірювання;

Вхідний опір підсилювача – $R_{вх}$.

Порядок розрахунку

1. Відповідно до степені нелінійності характеристики індуктивного перетворювача приймаємо його тип.

2. Визначаємо початковий зазор δ_0 між якорем та нерухомим осердям:

$$\delta_0 = \frac{\Delta\delta}{0{,}2} \div \frac{\Delta\delta}{0{,}1}, \qquad (36)$$

де $\Delta\delta = \Delta \cdot K_в$ – діапазон зміни зазору між якорем та осердям.

Приймаємо певне значення δ_0. Тоді:

$$\delta_{\min} = \delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2}; \qquad \delta_{\max} = \delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2}. \tag{37}$$

3. Як магнітопровід приймаємо Ш-подібне осердя з фериту (рис. 24).

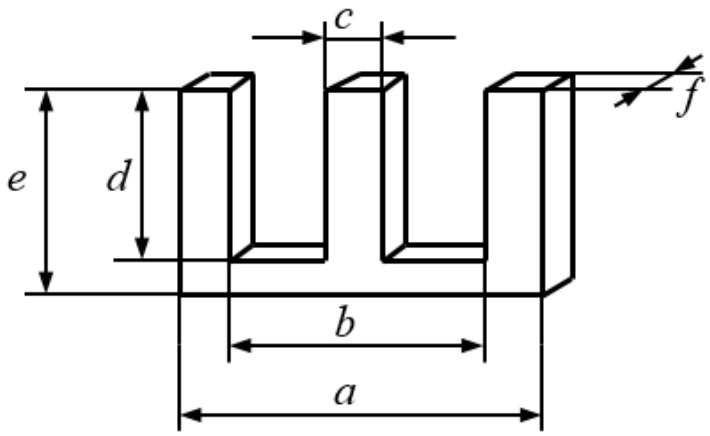


Рисунок 24 – Ш-подібні магнітопроводи з феритів

Розміри магнітопровіду Ш-подібне осердя наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Розміри осердя

Тип осердя	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
	мм					
ОШ – 3	10,6	7,5	3,0	2,8	4,5	3,0
ОШ – 4	14,0	10,0	4,0	3,8	5,9	4,0
ОШ – 5	17,5	12,5	5,0	4,7	7,4	5,0
ОШ – 6	21,0	15,0	6,0	5,7	8,9	6,0
ОШ – 7	30,0	19,3	7,2	10,1	15,2	7,3
ОШ – 12	42,0	29,4	12,0	15,2	21,5	15,8
ОШ – 17	55,0	37,5	17,3	19,2	27,7	21,7
ОШ – 20	65,0	44,0	20,2	22,4	32,5	27,8

Визначаємо можливий діапазон ширини середнього керна магнітопроводу:

$$c = \frac{\delta_0}{0{,}2} \div \frac{\delta_0}{0{,}1}. \tag{38}$$

Приймаємо певне значення *c* з визначеного діапазону з таблиці 4.

4. З таблиці 4 визначаємо тип та розміри осердя, які необхідні для розрахунків електричних параметрів перетворювача.

4.1. Середня довжина магнітних ліній:

$$\delta_1 = 2d + \pi(a-b) + (b-c), \text{ мм}. \tag{39}$$

4.2. Площа перерізу середнього керна:

$$s_1 = c \cdot f \text{ , мм}^2. \tag{40}$$

4.3. Площа вікна:

$$Q_в = d \cdot \frac{b-c}{2} \text{, мм}^2. \tag{41}$$

5. Визначаємо магнітний опір кола перетворювача:

$$R_м = R_о + R_\delta, \tag{42}$$

де $R_о = \frac{\delta_1}{\mu_1 s_1}$ – магнітний опір осердя,

$R_\delta = \frac{n\delta_0}{\mu_0 s_0}$ – магнітний опір повітряного зазору,

$\mu_1 = 8\pi \cdot 10^{-4}$ Гн/м – магнітна проникність осердя,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність повітря,

$n = 2$ – кількість повітряних зазорів.

Якщо величина зазору δ_0 мала в порівнянні з поперечними розмірами осердя, площа поперечного перерізу повітряної ділянки s_0 може бути прийнята рівною площі перерізу середнього керна s_1.

6. Визначаємо індуктивність перетворювача:

$$L = \frac{z_0}{\omega}, \tag{43}$$

де $z_0 = R_{вх}$ – повний опір перетворювача (активним опором обмотки нехтуємо);

$\omega = 2\pi f_0$ – кутова частота напруги живлення;

f_0 – частота напруги живлення, яка приймається згідно рекомендацій в залежності від необхідності забезпечення точності вимірювання.

7. Обчислюємо кількість витків обмотки перетворювача:

$$W = \sqrt{R_м L}. \tag{44}$$

8. Згідно з рекомендаціями приймаємо значення стабілізованої напруги U та визначаємо максимальний струм в обмотці котушки перетворювача:

$$I_{\max} = \frac{U}{R_{вх}}. \quad (45)$$

9. Визначаємо діаметр дроту обмотки перетворювача, виходячи із допустимої густини струму (2-2,5 А/мм^2):

$$d = 2\sqrt{\frac{I_{\max}}{\pi(2 \dots 2{,}5)}}. \quad (46)$$

10. З таблиці 5 вибираємо дріт за обчисленим діаметром без ізоляції.

Таблиця 5 – Параметри дротів

Діаметр дроту без ізоляції, мм	Площа поперечного перерізу, мм^2	Опір 1 м при 20^{0}С, Ом	Діаметр дроту з ізоляцією ПЭЛ, мм	Діаметр дроту з ізоляцією ПЭЛШО, мм
0,08	0,0050	3,630	0,090	0,140
0,09	0,0064	2,860	0,100	0,150
0,10	0,0079	2,230	0,115	0,165
0,11	0,0095	1,850	0,125	0,175
0,12	0,0113	1,550	0,135	0,185
0,13	0,0133	0,320	0,145	0,195
0,14	0,0154	1,140	0,155	0,205
0,15	0,0177	0,990	0,165	0,215
0,16	0,0201	0,873	0,175	0,225
0,17	0,0227	0,773	0,185	0,235
0,18	0,0255	0,688	0,195	0,245
0,19	0,0284	0,618	0,205	0,255
0,20	0,0314	0,558	0,215	0,280
0,21	0,0346	0,507	0,230	0,290
0,23	0,0416	0,423	0,250	0,310
0,25	0,0491	0,357	0,270	0,330
0,27	0,0573	0,306	0,295	0,355
0,29	0,0661	0,266	0,315	0,375
0,31	0,0755	0,233	0,340	0,400
0,33	0,0855	0,205	0,360	0,420
0,35	0,0962	0,182	0,380	0,440
0,38	0,1134	0,155	0,410	0,470
0,41	0,1320	0,133	0,440	0,505
0,44	0,1521	0,115	0,475	0,535
0,47	0,1735	0,101	0,505	0,565
0,49	0,1885	0,0931	0,525	0,585
0,51	0,2043	0,0859	0,545	0,610

11. Перевіряємо можливість розміщення обмотки у вікні осердя:

$$Q_в \geq k_н \frac{\pi d_{із}^2}{4} W, \tag{47}$$

де $d_{із}$ – діаметр дроту з ізоляцією;

$k_н$ – коефіцієнт нещільності обмотки, який вибирається з таблиці 6 в залежності від діаметра дроту разом з ізоляцією.

12. Визначаємо максимальну електромеханічну силу притягування якоря до осердя котушки перетворювача:

$$F_e = (I_{\max} W)^2 \frac{s_0 \mu_0}{9{,}81 \delta_{\min}^2}. \tag{48}$$

Таблиця 6 – Коефіцієнти нещільності обмотки

d, мм	$k_н$
0,08-0,11	1,3
0,15-0,25	1,25
0,35-0,41	1,2
0,51-0,93	1,1

13. Визначаємо мінімальне вимірювальне зусилля перетворювача, виходячи з максимальної електромеханічної сили притягування якоря до осердя котушки перетворювача:

$$F_п \approx 10 F_e. \tag{49}$$

Точність вимірювання для індуктивних вимірювальних приладів визначається в основному електронною схемою вторинного приладу. Оскільки в даному розрахунку електронна схема вторинного приладу не розглядається, то і розрахунок на відповідність максимальній допустимій похибці вимірювання не проводиться.

14. Зображуємо функціональну електричну схему вторинного вимірювального командного приладу, приклад якої для випадку двох команд керування представлено на рисунку 25.

Реактивні елементи Z1-Z3 разом із індуктивним перетворювачем Zx утворюють нерівноважний міст змінного струму (вимірювальну схему). Сигнал розбалансу моста підсилюється до необхідного рівня підсилювачем DA1 і вимірюється мілівольтметром PV, шкала якого проградуйована безпорередньо в одиницях геометричного параметру, який вимірюється. Елементи DA2, VT1, VD1, P1, R1 являють пристрій для подачі команди керування. Тобто секцій, утворених цими елементами має бути стільки, скільки вихідних команд керування повинен подати прилад.

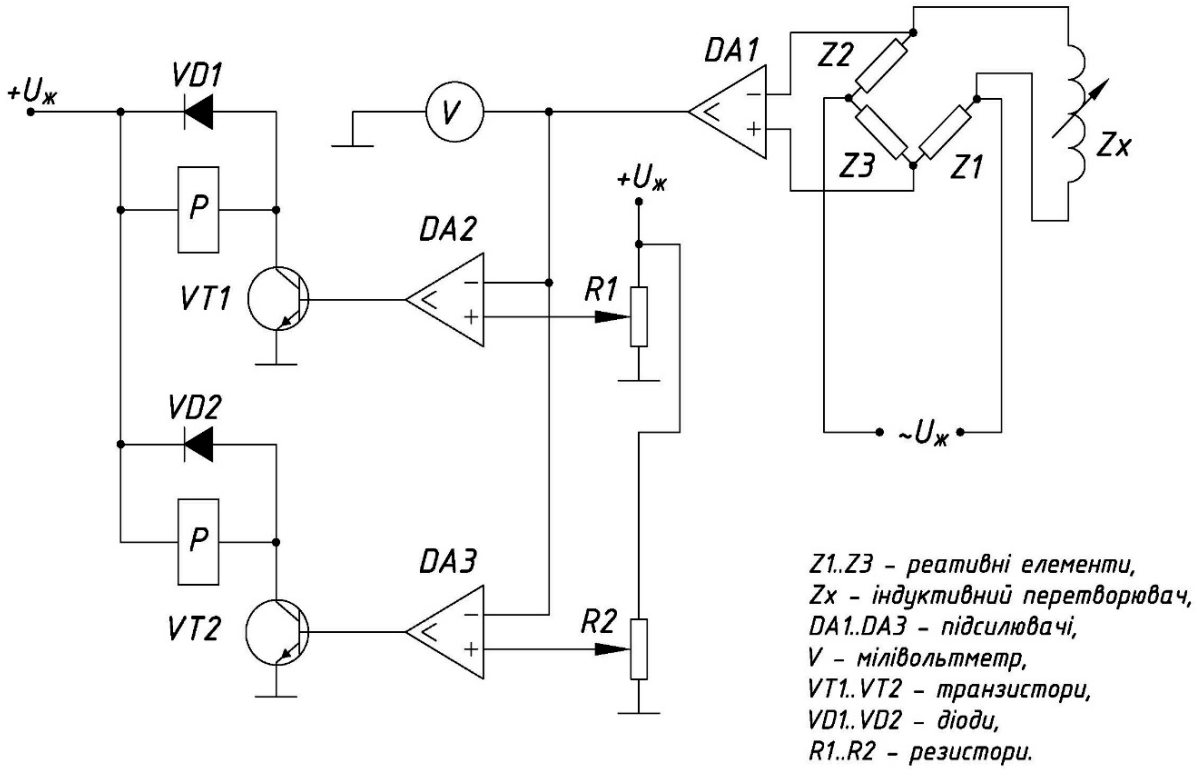


Рисунок 25 – Електрична схема індуктивних приладів

Підсилений сигнал розбалансу моста, який пропорційний вимірювальній величині подається на вхід компаратора DA2, на інший вхід компаратора подається фіксований сигнал встановленого рівня для спрацювання командного пристрою із потенціометра R1. Коли сигнали на обох входах компаратора зрівняються, на його виході з’явиться сигнал, який приведе до спрацьовування електронного ключа на транзисторі VT1. Транзистор VT1 відкриється і на обмотці електромагнітного реле з’явиться напруга живлення. Реле спрацює і своїми контактами, які працюють на замикання, чи на розмикання виконає подачу вихідної команди управління. Діод VD1 захищає ключ VT1 від високої напруги самоіндукції, яка може виникнути на обмотці електромагнітного реле в момент комутації.

Такий метод вимірювання індуктивності не є єдиним, тому можна запропонувати свою принципову схему вимірювання індуктивності датчика (наприклад включення датчика у резонансне коло).

3 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1 Приклад розрахунку пневматичного диференціального перетворювача

Вихідні дані:

1. Висота деталі: h = 50 мм;
2. Кількість команд керування – 2;
3. Діапазон вимірювання: 0-0,3 мм;
4. Ціна поділки лімбу налаштовування $i_к$ = 5 мкм;
5. Похибка спрацювання δ_z = 2 %;
6. Передаточне відношення $K_в$ = 2:1;
7. Робочий тиск $H = 2 \cdot 10^5$ МПа;
8. Довжина ділення шкали: a = 1 мм.

Розрахунок перетворювача:

1. Виходячи із стандартизованих даних і враховуючи рекомендації приймаємо вимірювальний перетворювач з плоскою заслінкою і вибираємо діаметр отвору вимірювального сопла d_2=2мм.

2. Оскільки прямолінійна ділянка характеристики вимірювальної системи згідно експериментальних даних обмежена значенням 0,17 мм для забезпечення степені нелінійності 1 % слід перевірити співвідношення:

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в = 0{,}3 \cdot 2 = 0{,}6 \ мм > 0{,}17 \ мм.$$

Оскільки умова $\Delta Z \le 0{,}17 \ мм$ не виконується, приймаємо $K_в$=1:2=0,5.

Тоді

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в = 0{,}3 \cdot 0{,}5 = 0{,}15 \ мм < 0{,}17 \ мм.$$

3. Характеристики пневматичної вимірювальної системи вибираємо за експериментальними даними з таблиці 2:

– діаметр отвору вхідного сопла d_1=1,5 мм;

– робочий тиск H=2·10^5 МПа;

– прямолінійна ділянка характеристики ΔZ =0,17 мм;

– вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки $Z_{ср}$=0,275 мм;

– передаточне відношення пневматичної вимірювальної системи K_z.=2,6·10^5 МПа/мм.

4. З принципової схеми сильфонного диференціального пневматичного вимірювального приладу слідує, що його загальне передаточне відношення дорівнює:

$$K_\Sigma = K_в K_z K_м K_c,$$

де $K_м$ – передаточне відношення механізму передачі від сильфона на стрілку;

K_c – передаточне відношення сильфонів.

4.1. Задана довжина ділення шкали a = 1 мм.

Приймаємо ціну ділення шкали $i_\Sigma = 1 \ мкм = 0{,}001 \ мм$.

Тоді необхідне загальне передаточне відношення

$$K_{\Sigma} = \frac{a}{i_{\Sigma}} = \frac{1}{0{,}001} = 1000.$$

4.2. Передаточне відношення на електричні контакти $K_c \cdot K_z$ приймаємо з діапазону 20-50:

$$K_c \cdot K_z = 30.$$

5. Здійснюємо перевірку умов спрацьовування контактів після заданої кількості їх замикання:

$$\frac{\Delta_{сп}}{K_z K_c} < \Delta_z.$$

5.1. Величина механічного та ерозійного спрацьовування після 25000 замикань для вольфраму:

$$\Delta_{сп} = 2 \ мкм = 0{,}2 \cdot 10^3 \ мм.$$

5.2. Допустима похибка вимірювання:

$$\Delta_z = \frac{\delta_z \Delta Z}{100} = \frac{2 \cdot 0{,}15}{100} = 0{,}3 \cdot 10^{-2} \ мм.$$

5.3. Перевіряємо умову:

$$\frac{\Delta_{сп}}{K_z K_c} = \frac{0{,}2 \cdot 10^3}{30} = 0{,}66 \cdot 10^{-4} \ мм < \Delta_z = 0{,}3 \cdot 10^{-2} мм.$$

6. Передаточне відношення механізму передачі від сильфона на стрілку:

$$K_м = \frac{k_{\Sigma}}{k_c \cdot k_z} = \frac{1000}{30} = 33{,}3.$$

7. Передаточне відношення на контакти з урахуванням передаточного відношення важеля $k_в$:

$$K_к = k_в k_z k_c = 0{,}5 \cdot 30 = 15.$$

8. Зусилля сильфонів визначаємо з умови:

$$P_c \geq P_м + P_к,$$

де $P_м = 0{,}3 \ H$ – амплітуда коливань зусилля притискання однієї пружини, а зусилля контактних пружин

$$P_к = n \cdot P + 0{,}5q \cdot l \cdot n.$$

8.1. Число контактів згідно з заданою кількістю команд керування n=2.

8.2. Жорсткість пружини q=0,02 Н/мм.

8.3. Величина переміщення контактів у замкнутому стані

$$l = \Delta \cdot K_к = 0{,}3 \cdot 15 = 4{,}5 \ мм.$$

8.4. Зусилля замикання контактів приймаємо згідно з рекомендаціями для вольфраму: P=0,15 Н.

8.5. Розраховуємо зусилля контактних пружин:

$$P_к = n \cdot P + 0{,}5q \cdot l \cdot n = 2 \cdot 0{,}15 + 0{,}5 \cdot 0{,}02 \cdot 4{,}5 \cdot 2 = 0{,}48 \ H.$$

8.6. Тоді зусилля сильфонів

$$P_c \geq P_м + P_к = 2 \cdot 0{,}3 + 0{,}48 = 1{,}08 \ H.$$

Приймаємо P_c=1,1 Н.

9. Визначаємо ефективну площу сильфонів:

$$F_e \geq \frac{P_c}{K_z \Delta_z} = \frac{1{,}1}{2{,}6 \cdot 10^5 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-2}} = 1{,}41 \cdot 10^{-3} \ м^2.$$

10. Знаходимо ефективний діаметр сильфонів:

$$D = 2\sqrt{\frac{F_e}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{1{,}41 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 0{,}042 \ м.$$

11. Визначаємо жорсткість сильфонів та їх пружної підвіски:

$$q_c \geq \frac{F_e K_z}{K_z K_c} = \frac{1{,}41 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}6 \cdot 10^5}{30} = 12{,}22 \ \frac{Н}{мм}.$$

12. Оскільки $K_c \cdot K_z$ не уточнювалося, загальне передаточне число приладу залишилось без змін.

13. Для зменшення похибки від коливання робочого тиску діаметри вхідних сопел обох ланок приймаємо рівними, а також приймаємо рівними діаметри робочого сопла та сопла протитиску.

14. Розраховуємо механізм лімбу налаштовування контактів, вважаючи, що лімб розбито на 10 поділок. Тоді крок різьби лімбу налаштовування буде:

$$S = 10 \cdot i_k \mathrm{K_в K_z K_c} \times 10^{-3} = 10 \cdot 5 \cdot 0{,}5 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0{,}75 \text{ мм}.$$

3.2 Приклад розрахунку компенсаційного пневматичного вимірювального перетворювача

Вихідні дані:

1. Висота деталі: h = 90 мм;
2. Кількість команд керування – 5;
3. Діапазон вимірювання: 0-0,8 мм;
4. Ціна поділки лімбу налаштовування $i_к$ = 2 мкм;
5. Похибка спрацювання δ_z = 2 %;
6. Передаточне відношення $K_в$ = 5:1;
7. Робочий тиск $H = 2 \cdot 10^5$ МПа;
8. Довжина ділення шкали: a = 1 мм.

Розрахунок перетворювача:

1. Виходячи із стандартизованих даних і враховуючи рекомендації, приймаємо вимірювальний перетворювач з плоскою заслінкою і вибираємо діаметр отвору вимірювального сопла d_2=2мм.

2. Оскільки прямолінійна ділянка характеристики вимірювальної системи згідно експериментальних даних обмежена значенням 0,17 мм для забезпечення степені нелінійності 1 % слід перевірити співвідношення:

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в = 0{,}8 \cdot 5 = 4 \ мм > 0{,}17 \ мм.$$

Оскільки умова $\Delta Z \leq 0{,}17 \ мм$ не виконується, приймаємо $K_в$=1:2=0,5.

Тоді

$$\Delta Z = \Delta \cdot K_в = 0{,}8 \cdot 0{,}2 = 0{,}16 \ мм < 0{,}17 \ мм.$$

3. Характеристики пневматичної вимірювальної системи вибираємо за експериментальними даними з таблиці 2:

– діаметр отвору вхідного сопла d_1=1,5 мм;

– робочий тиск H=2·10^5 МПа;

– прямолінійна ділянка характеристики ΔZ =0,17 мм;

– вимірювальний зазор в середині прямолінійної ділянки $Z_{ср}$=0,275 мм;

– передаточне відношення пневматичної вимірювальної системи K_z.=2,6·10^5 МПа/мм.

4. З принципової схеми мембранного компенсаційного перетворювача випливає, що його загальне передаточне відношення:

$$K_\Sigma = K_в K_z K_{мб} K_м,$$

де $K_м$ – передаточне відношення мікроміра, а $K_{мб}$ – передаточне відношення мембрани.

4.1. Задана довжина ділення шкали a = 1 мм.

Приймаємо ціну ділення шкали $i_\Sigma = 2 \ мкм = 0{,}002 \ мм.$

Тоді необхідне загальне передаточне відношення

$$K_\Sigma = \frac{a}{i_\Sigma} = \frac{1}{0{,}002} = 500.$$

4.2. Передаточне відношення до конічної голки приладу $K_п = K_z \cdot K_{мб}$ приймаємо рівним 30.

5. Визначаємо передаточне відношення мембрани:

$$K_{мб} = \frac{K_п}{K_z} = \frac{30}{2{,}6 \cdot 10^5} = 1{,}15 \cdot 10^{-4}.$$

6. Діаметри вхідних сопел приймаємо рівними:

$$d_{10} = d_1 = 1{,}5 \ мм.$$

7. Тоді умова компенсації: $f_2 = f_4$.

8. Передаточне відношення мікроміра:

$$K_{мб} = \frac{K_\Sigma}{K_в \cdot K_п} = \frac{500}{0{,}2 \cdot 30} = 83{,}33.$$

9. Визначаємо половину кута конуса голки 6:

$$\alpha = \arcsin \frac{d_2}{d_4 K_п} = \arcsin \frac{2}{1{,}5 \cdot 30} = 2{,}547^0,$$

де d_4=1,5 мм.

10. Визначаємо передаточне відношення до конічної голки з урахуванням передаточного відношення важеля $K_в$:

$$K_к = K_в K_z K_{мб} = 0{,}2 \cdot 30 = 6.$$

11. Зусилля притискання вимірювального стержня мікроміра:

$$P_м = (3 \div 4)\frac{\pi d^2}{4} \cdot H = 3{,}5 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 1{,}5^2}{4 \cdot 10^6} \cdot 2 \cdot 10^5 = 2{,}24 \ H.$$

12. Зусилля з боку контактних пружин, які забезпечують включення n = 5 команд керування:

$$P_к = n \cdot P + 0{,}5q \cdot l \cdot n,$$

де q=0,02 Н/мм – жорсткість пружин;

P=0,15 Н – зусилля замикання контактів згідно рекомендацій для вольфраму;

$l = \Delta \cdot K_к = 0{,}8 \cdot 6 = 4{,}8$ *мм* – величина переміщення контактів.

Тоді $P_к = n \cdot P + 0{,}5q \cdot l \cdot n = 5 \cdot 0{,}15 + 0{,}5 \cdot 0{,}02 \cdot 4{,}8 \cdot 5 = 0{,}99$ H.

13. Зусилля мембрани

$$P_{мб} \geq P_м + P_к = 1{,}24 + 0{,}99 = 2{,}23 \ H.$$

Приймаємо $P_{мб} = 2{,}23$ H.

14. Допустима похибка вимірювання:

$$\Delta_z = \frac{\delta_z \Delta Z}{100} = \frac{2 \cdot 0{,}16}{100} = 0{,}32 \cdot 10^{-2} \ мм.$$

15. Визначаємо ефективну площу мембрани:

$$F_e \geq \frac{P_{мб}}{K_z \Delta_z} = \frac{2{,}3}{2{,}6 \cdot 10^5 \cdot 0{,}32 \cdot 10^{-2}} = 2{,}764 \cdot 10^{-3} \ м^2.$$

де Δ_z визначаємо згідно формули (11).

16. Визначаємо діаметр мембрани:

$$D \geq 1{,}25\sqrt{\frac{P_{мб}}{K_z \Delta_z}} = 1{,}25 \cdot 0{,}0526 = 0{,}0657 \ м.$$

Діаметр жорсткого центру:

$$D_{ж} = 0{,}8D = 0{,}8 \cdot 0{,}0657 = 0{,}0525 \ м.$$

17. Розраховуємо механізм лімбу налаштовування контактів, вважаючи, що лімб налаштовування контактів розбито на 10 поділок. Тоді крок різьби лімбу налаштовування

$$S = 10 \cdot i_k \mathrm{K_в K_z K_{мб}} \times 10^{-3} = 10 \cdot 2 \cdot 0{,}2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0{,}12 \text{ мм.}$$

3.3 Приклад розрахунку індуктивного перетворювача

Вихідні дані:

1. Величина параметру, що контролюється – 30 мм;
2. Кількість вихідних команд керування – 1;
3. Діапазон вимірювання Δ – 0...0,2 мм.;
4. Похибка спрацювання δ_z = 0,5 %;
5. Передаточне відношення K_B = 1:1;
6. Степінь нелінійності характеристики – 10 %;
7. Характер переміщення вимірювальних щупів в процесі вимірювання – лінійний;
8. Вхідний опір підсилювача $R_{вх}$ = 350 Ом.

Розрахунок перетворювача:

1. Оскільки задана степінь нелінійності характеристики 10%, то для нашого пристрою вибираємо звичайний індуктивний перетворювач з рухомим якорем.

2. Визначаємо початковий зазор δ_0 між якорем та нерухомим осердям:

$$\delta_0 = \frac{\Delta\delta}{0,2} \div \frac{\Delta\delta}{0,1},$$

де $\Delta\delta = \Delta \cdot K_в$ – діапазон зміни зазору між якорем та осердям.

$$\delta_0 = \frac{0,2 \cdot 1}{0,2} \div \frac{0,2 \cdot 1}{0,1} = 1 \div 2 \ мм.$$

Приймаємо значення $\delta_0 = 1,5$ мм, тоді мінімальна і максимальна величини повітряного зазору будуть рівні:

$$\delta_{\min} = \delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2} = 1,5 - 0,1 = 1,4 мм;$$

$$\delta_{\max} = \delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2} = 1,5 + 0,1 = 1,6 мм.$$

3. Визначаємо ширину середнього керна магнітопроводу:

$$c = \frac{\delta_0}{0,2} \div \frac{\delta_0}{0,1}.$$

Підставивши в дану формулу вибране нами $\delta_0 = 1,5$ мм, отримаємо:

$$c = \frac{1,5}{0,2} \div \frac{1,5}{0,1} = 7,5 \div 15 мм.$$

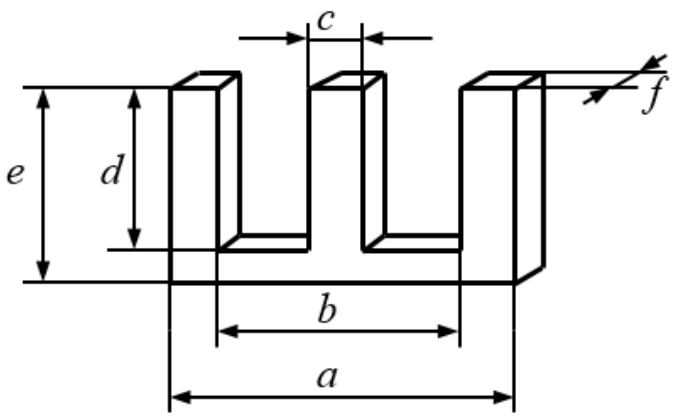
Користуючись довідниковою таблицею 4, вибираємо одне зі значень *c*, яке відповідає знайденому нами діапазону значень:

$$c = 12 \ мм.$$

З даних тієї ж таблиці вибираємо тип оксиферового осердя для індуктивного перетворювача:

Тип осердя – ОШ-12.

4. Визначаємо розміри осердя, які необхідні для розрахунків електричних параметрів перетворювача (рис. 26).



$a = 42,0 мм;$
$b = 29,4 мм;$
$c = 12,0 мм;$
$d = 15,2 мм;$
$e = 21,5 мм;$
$f = 15,8 мм.$

Рисунок 26 – Розміри Ш-подібного осердя магнітопровода

4.1. Середня довжина магнітних ліній:

$$\delta_1 = 2d + \pi(a-b) + (b-c),$$

$$\delta_1 = 2 \cdot 15{,}2 + \pi(42{,}0 - 29{,}4) + (29{,}4 - 12{,}0) = 87{,}384 \ мм.$$

4.2. Площа перерізу середнього керна:

$$S_1 = c \cdot f,$$

$$S_1 = 12{,}0 \cdot 15{,}8 = 189{,}6 мм^2.$$

4.3. Площа вікна:

$$Q_в = d \cdot \frac{b-c}{2},$$

$$Q_в = 15{,}2 \cdot \frac{29{,}4 - 12{,}0}{2} = 132{,}24 \ мм^2.$$

5. Визначаємо магнітний опір кола перетворювача:

$$R_м = R_o + R_\delta,$$

де $R_o = \frac{\delta_1}{\mu_1 S_1}$ – магнітний опір осердя;

$R_\delta = \frac{n\delta_0}{\mu_0 S_0}$ – магнітний опір повітряного зазору;

$\mu_1 = 8\pi \cdot 10^{-4}$ *Гн/м* – магнітна проникність осердя;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м* – магнітна проникність повітря;

$n = 1$ – кількість повітряних зазорів для прийнятої схеми перетворювача (рис. 19, а).

Оскільки площа повітряного зазору S_0 рівна площі перерізу осердя S_1, то, підставивши відповідні величини, отримаємо:

$$R_м = \frac{87{,}384}{8\pi \cdot 10^{-7} \cdot 189{,}6} + \frac{1 \cdot 1{,}5}{4\pi \cdot 10^{-10} \cdot 189{,}6} =$$

$$= 0{,}183 \cdot 10^6 + 6{,}316 \cdot 10^6 = 6{,}498 \cdot 10^6 \ \frac{1}{Гн}.$$

6. Визначаємо індуктивність перетворювача за формулою:

$$L = \frac{z_0}{\omega},$$

де $z_0 = R_{вх}$ – повний опір перетворювача (активним опором обмотки нехтуємо);

$\omega = 2\pi f_0$ – кутова частота напруги живлення;

f_0 – частота напруги живлення.

6.1. Для вибору частоти напруги живлення слід оцінити необхідну точність вимірювання. Для цього відповідно до заданої похибки спрацьовування δ_z визначаємо абсолютну похибку вимірювання з врахуванням передаточного числа важільного механізму $K_в$:

$$\Delta_z = \frac{\Delta \cdot K_в}{\delta_z \cdot 100} = \frac{0{,}2 \cdot 1}{0{,}5 \cdot 100} = 0{,}004 \ мм = 4 \ мкм.$$

Визначена абсолютна похибка вказує на те, що прилад слід вважати високоточним. Тому значення частоти напруги живлення необхідно вибирати в межах 3-10 кГц. Приймаємо f_0 =5 кГц.

6.2. Розраховуємо індуктивність перетворювача:

$$L = \frac{R_{вх}}{2\pi \cdot f_0} = \frac{350}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3} = 0{,}0111 \ \ Гн .$$

7. Обчислюємо кількість витків обмотки перетворювача:

$$W = \sqrt{R_м L} = \sqrt{6{,}498 \cdot 10^6 \cdot 0{,}0111} \approx 269.$$

Отже, для котушки перетворювача приймаємо W = 270 витків.

8. Визначаємо діаметр дроту обмотки перетворювача, виходячи із допустимої густини струму (2-2,5 А/мм^2):

$$d = 2\sqrt{\frac{I_{\max}}{\pi(2 \div 2{,}5)}}.$$

8.1. Приймаємо значення стабілізованої напруги живлення в межах рекомендацій U= 20 В.

8.2. Максимальне значення струму в котушках перетворювача:

$$I_{\max} = \frac{U}{R_{вх}} = \frac{20}{350} = 5{,}714 \cdot 10^{-2} \ \ A.$$

8.3. Отже, діаметр дроту лежить в межах:

$$d = 2\sqrt{\frac{I_{\max}}{\pi(2 \div 2{,}5)}} = 2\sqrt{\frac{5{,}714 \cdot 10^{-2}}{\pi(2 \div 2{,}5)}} = 0{,}19...0{,}17 \ \ мм.$$

9. За обчисленим значенням обираємо дріт, діаметр якого без ізоляції становить 0,17 *мм.* Запишемо дані для дроту вибраного діаметра з таблиці 5:

– площа поперечного перерізу – 0,0227 *мм*^{2};

– опір 1 метру дроту при 20 ^{0}С – 0,773 *Ом*;

– діаметр дроту з ізоляцією марки ПЭЛ – 0,185 *мм*;

– діаметр дроту з ізоляцією марки ПЭЛШО – 0,235 *мм*.

10. Перевіряємо можливість розміщення обмотки у вікні осердя. Для цього повинна виконуватися умова:

$$Q_в \geq k_н \frac{\pi d_{із}^2}{4} W,$$

де $d_{із}$ – діаметр дроту з ізоляцією,

$K_н$ =1,25 – коефіцієнт нещільності обмотки, який вибирається з таблиці 6 залежно від діаметра дроту разом з ізоляцією.

Перевіримо дану умову для двох марок дротів:

– для ПЭЛ: $k_н \frac{\pi d_{із}^2}{4} W = 1{,}25 \frac{\pi \cdot 0{,}185^2}{4} 270 = 9{,}072 \ \ мм^2$;

– для ПЭЛШО: $k_н \frac{\pi d_{із}^2}{4} W = 1{,}25 \frac{\pi \cdot 0{,}235^2}{4} 270 = 14{,}638 \ \ мм^2$.

Оскільки обидва значення є меншими за $Q_в = 132{,}24 мм^2$, то в даному перетворювачі можна застосовувати дроти обох марок.

11. Визначаємо максимальну електромеханічну силу притягування якоря до осердя котушки перетворювача:

$$F_e = (I_{\max} W)^2 \frac{S_0 \mu_0}{9{,}81\delta_{\min}^2}.$$

Підставивши значення в дану формулу, одержимо:

$$F_e = (5 \cdot 10^{-2} \cdot 270)^2 \frac{189{,}6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{9{,}81 \cdot 1{,}4^2} = 2{,}258 \cdot 10^{-3}\, H.$$

12. Визначаємо мінімальне вимірювальне зусилля перетворювача, виходячи з максимальної електромеханічної сили притягування якоря до осердя котушки перетворювача:

$$F_n \approx 10 F_e,$$

$$F_n \approx 10 \cdot 2{,}258 \cdot 10^{-3} = 2{,}258 \cdot 10^{-2}\, H.$$

Точність вимірювання для індуктивних вимірювальних приладів визначається в основному електронною схемою вторинного приладу. Оскільки в даному розрахунку електронна схема вторинного приладу не розглядається, то і розрахунок на відповідність максимальній допустимій похибці вимірювання не проводиться.

13. Зображуємо функціональну схему вторинного вимірювального командного приладу.

Реактивні елементи *Z1*..*Z3* разом з індуктивним перетворювачем *Zx* утворюють нерівноважний міст змінного струму (вимірювальну схему). Сигнал розбалансу моста підсилюється до необхідного рівня підсилювачем *DA1* і вимірюється вольтметром *V*, шкала якого проградуйована безпосередньо в одиницях геометричного параметру, який вимірюється. Елементи *DA2*, *VT1*, *VD1*, *P1*, *R1* являють пристрій для подачі команди керування. Підсилений сигнал розбалансу моста, який пропорційний вимірювальній величині подається на вхід компаратора *DA2*, на інший вхід компаратора подається фіксований сигнал встановленого рівня для спрацювання командного пристрою із потенціометра *R1*. Коли сигнали на обох входах компаратора зрівняються, на його виході з'явиться сигнал, який приведе до спрацьовування електронного ключа на транзисторі *VT1*. Транзистор *VT1* відкриється і на обмотці електромагнітного реле з'явиться напруга живлення. Реле спрацює і своїми контактами, які працюють на замикання, чи на розмикання виконає подачу вихідної команди управління. Діод *VD1* захищає ключ *VT1* від високої напруги самоіндукції, яка може виникнути на обмотці електромагнітного реле в момент комутації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань. Частина І: конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2020. 148 с.

2. Нестерчук Д. М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій. Мелітополь: Люкс, 2020. 256 с.

3. Солтис І. В., Деревянчук О. В. Основи метрології: навч. посіб. Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

4. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

5. Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Базіло К. В. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації: навч.-метод. посіб. Черкаси: ЧДТУ, 2020. 321 с.

6. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Розроблення блоку цифрової індикації електроакустичного твердоміра. *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. 2023. Вип. 22. С. 122-126.

7. Пташенчук В. В., Денисюк В. Ю., Симонюк В. П. Вимірювання теплових деформацій торцешліфувальних автоматів та їх вплив на операційну точність оброблення підшипникової сталі ШХ15. *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. 2022. Вип. 21. С. 102-106.

8. Денисюк В. Ю. Динамічні похибки в системах активного контролю та їх визначення в умовах експлуатації. *«Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022»*: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 9-10 листопада 2022 р. Львів, 2022. С. 53-55.

9. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. *«Перспективні технології та прилади»:* зб. статей. 2020. Вип. 16. С. 38-47.

10. Денисюк В. Ю. Аналіз особливостей конструювання та метрологічного забезпечення приладів активного контролю. *Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 32-37.

Контрольно-вимірювальні прилади : методичні вказівки до виконання курсової роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування (17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації) спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка (176 Мікро- та наносистемна техніка) денної та заочної форм навчання / уклад. В. Ю. Денисюк. Луцьк: ЛНТУ, 2024. 52 с.

Комп’ютерний набір В.Ю. Денисюк

Редактор В.Ю. Денисюк

Підп. до друку «__» 2024 р. Папір офс.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 3,25. Обл.-вид. арк. 3,25.
Тираж 30 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП ЛНТУ