



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-44

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
„Проектування пристроїв автоматизації”
студентами спеціальності 7.05020201 „Автоматизоване управління
технологічними процесами”
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано методичною
комісією за спеціальністю
„Автоматизоване управління
технологічними процесами”.
Протокол №2 від 21.10.2013 р.

Рівне 2013



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни „Проектування пристроїв автоматизації” студентами спеціальності 7.05020201 „Автоматизоване управління технологічними процесами” денної та заочної форм навчання / А.В. Рудик. – Рівне: НУВГП, 2013. – 46 с.

Упорядник: А.В. Рудик, канд. техн. наук, доцент.

Відповідальний за випуск: В.В. Древецький, доктор техн. наук, професор, академік ІАУ, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп’ютерно-інтегрованих технологій.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Рудик А.В. 2013

© НУВГП, 2013



ЗМІСТ

Робота 1. Проектування резистивного давача сили.....	4
Робота 2. Проектування тензорезистивного давача.....	13
Робота 3. Проектування індуктивного давача.....	22
Робота 4. Проектування ємнісного давача.....	30
Робота 5. Розрахунок системи вимірювання температури.....	42

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам/ Под ред. А.В. Калиниченко. – М.: Инфра-Инженерия, 2008.
2. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2002.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007.
4. Кафаров И.К. Автоматические регуляторы технологических процессов/ Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006.
5. Лакозюк В.М. Мікропроцесори та мікро-ЕОМ у виробничих системах: Посібник. – К.: Видавничий центр "Академія", 2002.
6. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. – Львів: Новий світ, 2004. – 208 с.
7. Томашевський В.М. Моделювання систем. – К.: Видавнича група ВНУ, 2005. – 215 с.
8. Катренко А.В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навчальний посібник. – Львів: "Новий світ-2000", 2007.
9. Новиков Ю.В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования. – М.: Мир, 2001. – 379 с.



Робота 1. Проектування резистивного давача сили.

1.1. Мета роботи.

Вивчити методику проектування резистивних (реостатних) давачів сили.

1.2. Теоретичні відомості.

Вхідною величиною реостатного перетворювача є лінійне чи кутове переміщення движка (щітки), а вихідною – змінний опір.

Для перетворення вимірюваної механічної величини в переміщення движка реостатного перетворювача використовують різні перетворювачі. Наприклад, при вимірюванні тиску можуть бути використані такі механічні пружні перетворювачі, як мембрани, сільфони, трубки Бурдона, спіральні і гвинтові трубки з внутрішнім тиском й ін. Широко застосовують різного роду допоміжні елементи, наприклад, важелі, редуктори для виміру масштабів переміщень.

Перевагою реостатних давачів є можливість одержання досить великого вихідного сигналу, причому реостатний перетворювач давача може житися як постійним, так і змінним струмом. Реактивний опір реостатного перетворювача в діапазоні робочих частот дуже малий (малі власні індуктивності й ємності), а верхня границя цього діапазону складає кілька кГц.

Велика амплітуда вихідного сигналу часто дозволяє проводити подальшу його обробку і реєстрацію без застосування додаткових підсилювальних пристроїв, що знижують точність результатів вимірів.

Динамічні властивості реостатних давачів невисокі, тому їх застосовують для вимірювання статичних чи повільно мінливих величин. Обмеження швидкості зміни вимірюваної величини викликано наявністю механічних зв'язків і значних приєднаних мас у кінематичних колах давачів, що створює велику інерційність і знижує (при порівняно невеликій жорсткості) власну частоту давача до 2...10 Гц. Іншим важливим фактором, що знижує динамічні властивості реостатних давачів, є необхідність забезпечення стійкого контакту між движком і обмоткою реостатного перетворювача. При великих швидкостях переміщення движка можлива втрата контакту. Це явище особливо властиве провідним реостатним перетворювачам.



чам, контактна доріжка в яких являє собою хвилеподібну поверхню. Наявність механічних вібрацій при роботі давача збільшує ймовірність порушення контакту. У цьому випадку має місце явище «підскоку» движка, особливо на резонансних частотах.

Прагнення забезпечити стійкий контакт приводить до необхідності збільшення притискаючого зусилля, що в свою чергу погіршує динамічні властивості. Це пов'язано зі збільшенням зусилля, необхідного для переміщення движка, що накладає обмеження на інтенсивність впливу вимірюваної величини. Спотворення давачем досліджуваного чи контрольованого процесу має бути мінімальним в рамках допустимих похибок. Звідси випливає вимога зниження зусилля, прикладеного до вхідних елементів давача. При проектуванні необхідно приймати компромісне рішення, виходячи з мінімальної сумарної похибки, викликаной спотворенням досліджуваного процесу і можливою короткочасною втратою контакту.

В даний час промисловість випускає велику кількість прецизійних малогабаритних реостатних перетворювачів (потенціометрів) як однооборотних, так і багатоборотних. Тому при проектуванні реостатних давачів відкриті широкі можливості вибору уніфікованого перетворювача. У тих випадках, коли з тих чи інших причин промисловий перетворювач використовувати не можна, необхідно його спроектувати. Тому зупинимося докладніше на питаннях проектування реостатних перетворювачів.

Реостатний перетворювач (рис. 1.1, а) складається з каркаса А, на який намотаний ізолюваний провід (2). По верхній грані каркаса, частина бічної поверхні якого показана на рис. 1.1, б, ковзає щітка (3) движка реостата. Ізоляція проводу для забезпечення електричного контакту зачищена. Напряму живлення перетворювача подають до двох крайніх затискачів, вихідну величину знімають між одним з крайніх затисків і середнім затиском, з'єднаним з струмоз'ємним кільцем (3), по якому ковзає щітка. Валик движка електрично ізолюваний від інших елементів движка.

Електрична схема перетворювача показана на рис. 1.1, в. Функція перетворення реостатного перетворювача $U = f(I_x)$ визначається співвідношенням:

$$U_x = \frac{U_0 \cdot I_x \cdot N_0}{I + (R_0/R_H) \cdot (I_x/N_0) \cdot [1 - (I_x/N_0)]}, \quad (1.1)$$



де U_x – вихідна напруга; l_x – вхідне переміщення; l_0 – загальна довжина обмотки перетворювача; R_0 – загальний опір перетворювача; R_H – опір навантаження; U_0 – напруга живлення. Для випадку кутового переміщення $l_x = r\varphi_x$, де r – радіус каркасу перетворювача; φ_x – вхідне кутове переміщення.

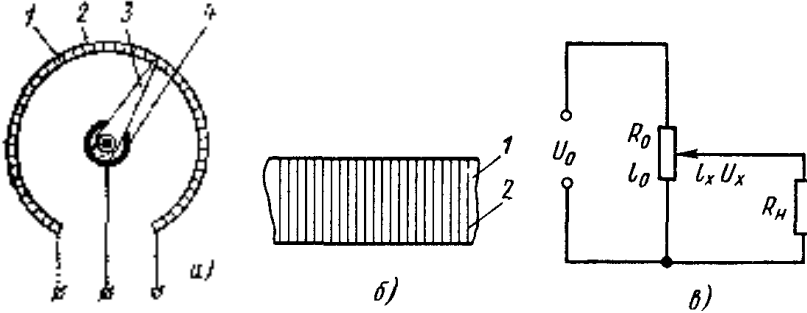


Рис. 1.1. Реостатний перетворювач:

a – схема пристрою; *б* – каркас; *в* – схема електричного кола

Розрахунок реостатних перетворювачів.

Довжину витка реостатного перетворювача приблизно можна визначити за формулою

$$l_g = 2(H + b), \quad (1.2)$$

де H – висота каркаса; b – його товщина.

В тих випадках, коли каркас профільований (випадок функціонального реостатного перетворювача), витки розташовують не перпендикулярно прямолінійній кромці каркаса, а під кутом α , що дорівнює поточному куту підйому каркаса. Тоді:

$$l_g = 2(H_\alpha + b)/\cos \alpha, \quad (1.3)$$

де H_α – поточна висота каркасу.

Для лінійного давача $\alpha = 0$ і вираз (1.3) переходить в (1.2).

Довжину витка можна також визначити, виходячи із загального опору перетворювача R_0 , діаметра d , питомого опору ρ застосованого проводу і числа витків n :

$$l_g = R_0 \cdot d^2 / 4n\rho, \quad (1.4)$$

Прирівнюючи (1.2) і (1.4), знайдемо висоту каркасу:

$$H = \frac{\pi \cdot R_0 d^2}{8n\rho} - b. \quad (1.5)$$



Діаметр проводу визначаємо виходячи з допустимої густини струму за формулою:

$$d = 0,36 \sqrt[4]{P/R_0},$$

де P – потужність розсіювання, Вт.

З (1.5) загальний опір перетворювача обчислюється так:

$$R_0 = \frac{8(H + b)np}{\pi \cdot d^2}. \quad (1.6)$$

При розрахунку задаються рядом величин у формулах (1.5) та (1.6) і через них визначають інші.

Якщо параметри навантаження задані, то значення загального опору перетворювача можна визначити, виходячи з допустимої похибки лінійності. Питомий опір ρ визначається при виборі проводу.

Матеріали. Для виготовлення обмоток реостатних перетворювачів застосовують велику кількість різних сплавів. Матеріал проводу має високий питомий опір, малий температурний коефіцієнт опору, високу часову стабільність характеристик, високу корозійну стійкість, високоякісну ізоляцію, а також велику стійкість на розрив. У реостатних перетворювачах широко використовуються обмотки з константану, ніхрому, манганіну. Однак обмотки з цих матеріалів застосовують у перетворювачах невисокої точності. Це пояснюється тим, що константан, наприклад, має порівняно невисоку температуру нагрівання, ніхром – великий температурний коефіцієнт опору, а манганін окислюється. Тому коли потрібна висока точність і надійність у жорстких умовах експлуатації застосовують проводи з благородних металів. Найбільш придатні сплави з платини, золота, срібла та паладію. Такі сплави хімічно нейтральні і не піддаються корозії навіть при високій температурі.

Діаметр проводу зазвичай коливається від 0,03 до 0,3 мм. Прагнення до мініатюризації приводить до використання проводу діаметром 0,01 мм.

При виборі матеріалу каркасу враховують його діелектричні, антикорозійні й антимагнітні властивості. Якщо вимоги до твердості й точності розмірів невисокі, то застосовують різні неметалічні матеріали: текстоліт, гетинакс ебоніт, органічне скло, пресовану кераміку. Недоліки неметалічних матеріалів: гігроскопічність, низька провідність та теплоємність.

У випадку високих вимог до твердості і точності застосовують



каркаси з алюмінієвих сплавів. Металеві каркаси ізолюють різними лаками.

Важливе значення в реостатних перетворювачах має стійкий контакт між струмознімаючим елементом движка й обмоткою, малий перехідний опір контакту і його стабільність. Якість контакту визначається головним чином застосовуваними матеріалами. Матеріал щітки движка має бути зносостійким, легко оброблятися. При виготовленні щіток з неблагородних металів доводиться миритися з нестабільністю перехідного опору, що викликається перепадами температури, впливом домішок, що містяться в повітрі, утворенням оксидних плівок. Кращими матеріалами є благородні метали (платина, паладій, іридій) і їхні сплави (платина-іридій, паладій-іридій). Щітка може бути виконана з декількох жил проводу чи пакета пластин. Часто також використовують стрижні циліндричної форми. Контактний тиск забезпечується гнучкістю движка і коливається для різних конструкцій щіток у межах $(3 - 100) \cdot 10^{-3} \text{ Н}$.

1.3. Порядок роботи.

1. Визначити технічні параметри реостатного давача сили, виходячи з умов технічної задачі.
2. В середовищі КОМПАС накреслити давач сили з розрахованими параметрами.

1.4. Порядок виконання роботи.

1. Вибрати чутливий елемент і визначити його чутливість.
2. Вибрати вторинний прилад та визначити його статичний коефіцієнт перетворення.
3. Визначити довжину робочої частини реостатного давача.
4. Визначити крок намотування та кількість витків.
5. Визначити діаметр каркасу намотування реостатного давача.
6. Перевірити нормальність роботи розрахованого давача.
7. В середовищі КОМПАС створити технічну документацію на розрахований давач.

1.5. Приклад розв'язання.

Розрахувати реостатний давач для дистанційного виміру механічної сили $F = 50 \text{ Н}$ з похибкою не більше $0,1 \text{ Н}$. Вихідні дані згідно варіантів наведені в таблиці 1.1.



Завдання до виконання роботи згідно варіанту

Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Параметри															
F	75	60	40	30	35	85	70	45	65	50	75	60	40	30	35
ΔF	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.05	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1

Як сприймаючий елемент вибираємо пружину (рис. 1.2). При зміні сили $dF = 1 \text{ Н}$ сила переміщає движок потенціометра на $dx = 2 \text{ мм}$, тобто чутливість пружини становить:

$$k = \frac{dx}{dF} = 2 \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

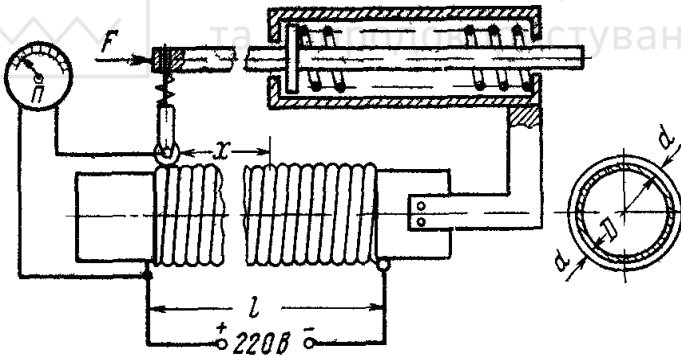


Рис. 1.2. Реостатний давач поступального руху

Вибираємо вторинний прилад – вольтметр магнітоелектричної системи зі шкалою до 250 В та опором $r_n = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом}$.

Вибираємо статичний коефіцієнт перетворення – чутливість давача $k_d = 4 \frac{\text{В}}{\text{Н}}$. Тоді при силі 50 Н показ вольтметра буде дорівнювати $U_n = 200 \text{ В}$.



Визначивши довжину робочої частини реостатного давача

$x_{max} = F \cdot k = 50 \cdot 2 = 100$ мм, з виразу

$$\frac{x_{max}}{l} = \frac{U_n}{U}$$

знайдемо довжину всього намотування давача:

$$l = \frac{U}{U_n} x_{max} = \frac{220}{200} \cdot 100 = 110 \text{ мм.}$$

При виборі обмотувального проводу необхідно пам'ятати, що його діаметр не може бути більше кроку намотування. Крок намотування Δl визначають за чутливістю k і заданою похибкою виміру ($0,1 H$):

$$\Delta l = 0,1 \cdot k = 0,2 \text{ мм.}$$

Вибираємо ніхромовий провід з такими параметрами: діаметр $d = 0,15$ мм (з ізоляцією $d_{iz} = 0,17$ мм, площа поперечного перерізу $q = 0,0177$ мм²). Питомий опір ніхрому становить $\rho = 1,1$ Ом·мм²/м (вибирається з довідника).

Загальна кількість витків реостатного давача дорівнює

$$\omega = \frac{l}{\Delta l} = \frac{110}{0,2} = 550 \text{ витків.}$$

При визначенні опору r реостатного перетворювача варто врахувати, що для одержання лінійної характеристики він має бути в межах $\frac{r_n}{8 \div 10}$. Приймаємо $r = \frac{5 \cdot 10^4}{10} = 5 \cdot 10^3$ Ом. Тоді опір робочої частини давача становить:

$$r_x = r \frac{x_{max}}{l} = 5 \cdot 10^3 \cdot \frac{100}{110} = 4550 \text{ Ом.}$$

Довжина обмотувального приводу дорівнює:

$$l_{об} = \frac{r \cdot q}{\rho} = \frac{5000 \cdot 0,0177}{1,1} = 80 \text{ м,}$$

а довжина одного витка –

$$l_{cp} = \frac{l_{об}}{\omega} = \frac{80 \cdot 10^3}{550} = 145 \text{ мм.}$$



Діаметр D каркасу знаходимо з рівняння:

$$l_{cp} = \pi \cdot (D + d); \quad D = \frac{l_{cp} - \pi \cdot d}{\pi} = \frac{145}{3,14} - 0,15 = 46 \text{ мм.}$$

Густина струму в реостатному давачі становить:

$$i = \frac{U}{r \cdot q} = \frac{220}{5000 \cdot 0,0177} = 2,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Допустима густина струму даних давачів складає $2 \dots 3 \text{ А/мм}^2$.

Знайдемо питому бічну поверхню охолодження, що має бути в межах $\sigma_0 \geq 5 \div 7 \text{ см}^2 / \text{Вт}$, якщо температура обмотки реостатного давача перевищує температуру навколишнього середовища не більше ніж на 40°C .

Потужність, що виділяється реостатним давачем, обчислюється за формулою:

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{220^2}{5 \cdot 10^3} = 9,7 \text{ Вт},$$

а бічна поверхня намотування –

$$S = \pi \cdot D \cdot l = 3,14 \cdot 4,6 \cdot 11 = 159 \text{ см}^2.$$

Питома бічна поверхня охолодження становить:

$$\sigma_0 = \frac{S}{P} = \frac{159}{9,7} = 16,4 \text{ см/Вт}.$$

Таким чином, розрахований реостатний давач буде знаходитися в нормальному тепловому режимі.

Приклад креслення давача сили за розрахованими параметрами в середовищі КОМПАС наведений на рис. 1.3.

1.6. Контрольні питання.

1. За якими принципами вибирають сприймаючий елемент давача?
2. За яких умов визначають значення кроку намотування реостатного давача?
3. Яка допустима густина струму реостатного давача?
4. Яке мінімальне значення питомої бічної поверхні охолодження реостатного давача?

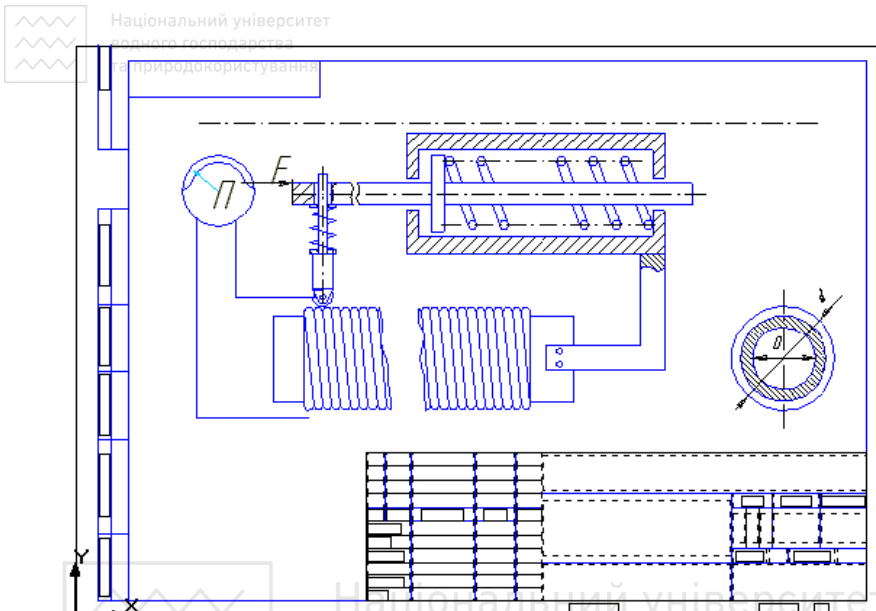


Рис. 1.3. Креслення реостатного давача поступального руху



Робота 2. Проектування тензорезистивного давача.

2.1. Мета роботи.

Вивчити методику проектування тензорезистивних датчиків.

2.2. Теоретичні відомості.

Проектування тензорезистивного датчика має складатися з таких етапів:

- вибір і розрахунок пружного елемента;
- вибір і розрахунок вимірювального кола;
- розрахунок допоміжних деталей і вузлів;
- конструкторська розробка датчика.

Тип пружного елемента необхідно вибирати в першу чергу на основі вимог до чутливості датчика, а в деяких випадках вимога високої чутливості має поєднуватися з вимогами високої швидкодії. Для досягнення компромісного рішення між чутливістю і швидкодією доцільно кожен пружний елемент характеризувати добутком чутливості на власну частоту:

$$A = f_0 \cdot S, \quad (2.1)$$

де f_0 – власна частота пружного елемента; S – чутливість пружного елемента.

Підстановка в (2.1) власної частоти і чутливості дає наступний вираз для добутку чутливості на власну частоту:

$$A = \frac{C \cdot B}{V \sqrt{E \cdot \rho}}, \quad (2.2)$$

де V – об'єм пружного елемента; E – модуль пружності матеріалу пружного елемента; ρ – густина матеріалу пружного елемента; B – конструктивний коефіцієнт чутливості; C – числовий коефіцієнт у виразі для власної частоти пружного елемента.

Оскільки від величини C залежить власна частота пружного елемента, яка є характеристикою швидкодії, то назвемо його конструктивним коефіцієнтом швидкодії.

Конструктивний коефіцієнт швидкодії для стрижневого пружного елемента складає 0,249, для кільцевого – 0,778, для мембранного – 1,54, для балкового – 0,160. З огляду на те, що конструктивні кое-

фікції чутливості кожного типу конструкції пружного елемента відомі, можна пружні елементи різних конструкцій порівнювати між собою за величиною добутку $a = C \cdot B$. Назвемо цей добуток інформаційним коефіцієнтом пружного елемента. Так при максимальних значеннях конструктивного коефіцієнта інформаційний коефіцієнт стрижневого пружного елемента складе 0,25, кільцевого – 1,5, мембранного – 2,0, балкового – 0,96. Тому найбільш перспективним пружним елементом є мембранний, найменш – стрижневий. Це необхідно враховувати при виборі типу пружного елемента.

Додаткові передумови для вибору матеріалу елемента впливають з виразу (2.2). Видно, що потрібен матеріал з мінімальним значенням добутку модуля пружності на густину. Так, перехід зі сталі на сплави алюмінію за інших рівних умов дає значний вигравш у величині A , тому що добуток $E \cdot \rho$ для сплавів алюмінію приблизно в 9 разів менший, ніж для сталі. Перспективними в цьому відношенні є магнієві сплави, що мають добуток $E \cdot \rho$ менший, ніж у сталі, у 16 разів.

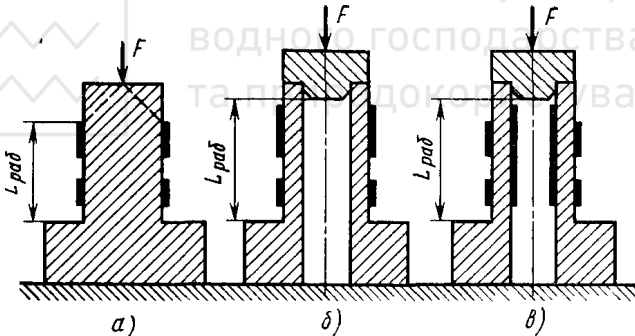


Рис. 2.1. Типи пружних елементів: а – суцільний пружний елемент, б, в – циліндричні пружні елементи з тензорезисторами на одній і двох поверхнях відповідно

Подальше збільшення добутку власної частоти на чутливість досягається зменшенням об'єму пружного елемента. Це, насамперед, забезпечується належним вибором робочої довжини пружного елемента, що використовується під наклеювання. Так, для стрижневого пружного елемента робочу довжину (рис. 2.1, а) вибирають у межах $(1,2 \div 2) \cdot L_{mp}$, де L_{mp} – довжина тензорезистора. Зменшення робочої довжини може бути досягнуте в циліндричному пружному елементі (рис. 2.1, б, в) за рахунок розміщення тензорезисторів, що



сприймають поздовжню деформацію, на внутрішній поверхні циліндра, а тензорезисторів, що сприймають поперечну деформацію, - на зовнішній поверхні, як це показано на рис. 2.1, в.

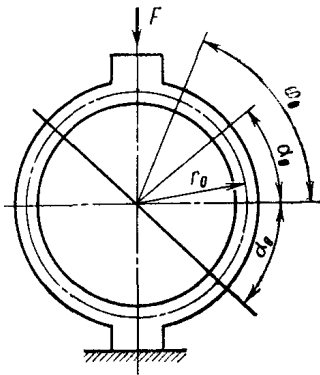


Рис. 2.2. Конструктивна схема кільцевого пружного елемента з жорсткими закріпленнями

Робоча довжина кільцевого пружного елемента визначається кутом α_0 , у межах якого деформація поверхневих зерен кільця не змінює знаку, і її вибирають у межах $(1,0 \div 1,2) \cdot L_{mp}$. Кут залежить від кута жорсткого закріплення φ_0 (рис. 2.2):

$$\cos \alpha_0 = \sin \varphi_0 / \varphi_0.$$

Тому, вибравши з конструктивних міркувань кут жорсткого закріплення і розрахувавши α_0 , можна за заданою довжиною тензорезистора визначити середній радіус кільця:

$$r_0 = (1,0 \div 1,2) \cdot L_{mp} / 2\alpha_0.$$

Для мембранного пружного елемента робоча довжина визначається мінімальною величиною зони деформацій, яка при використанні радіальних деформацій дорівнює $0,369 \cdot r$, де r – радіус мембрани. З огляду на те, що мембрана повинна мати жорсткий центр, приймають $L_{mp} = 0,30 \div 0,35 \cdot r$, звідки радіус мембрани $r = (0,28 \div 0,33) L_{mp}$. Довжину балкового пружного елемента вибирають в межах $(1,2 \div 1,5) L_{mp}$. Ширина обраного тензорезистора визначає ширину кільцевого і балкового пружних елементів і мінімальний радіус стрижневого пружного елемента. Ширину кільця приймають рівною $(1,1 \div 1,2) b_{mp}$, де b_{mp} – ширина тензорезистора, а ширину балки – $(2,2 \div 2,4) b_{mp}$. Мінімальний радіус стрижневого пружного елемента знаходять за такими формулами:

$$r_{min} = b_{mp} / \pi; \quad r_{min} = L_{mp} / 2\pi.$$

Зміною товщини пружного елемента, як правило, домагаються заданої чутливості давача. Справді, вираз для чутливості давача сили з стрижневим пружним елементом, наприклад, у відповідності



до структурної схеми, можна записати в такому вигляді:

$$S_D = \frac{U_{вих}}{F_x} = U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{nC_z S}{s_{cm} E}, \quad (2.3)$$

де $U_{вих}$ – вихідна напруга давача (номінальний сигнал); F_x – вимірювана сила (номінальне навантаження); U – напруга живлення давача; k – коефіцієнт симетрії вимірювального кола; n – число робочих плечей вимірювального кола; C_z – еквівалентний коефіцієнт деформацій; S – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора; s_{cm} – площа поперечного перерізу стрижневого пружного елемента; E – модуль пружності матеріалу пружного елемента.

Виразивши площу перетину пружного елемента через геометричні розміри, одержимо:

$$S_D = U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{4nC_z S}{\pi(d_3^2 - d_B^2)E} = U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{nC_z S}{\pi d_{cp} h E}, \quad (2.4)$$

де d_3, d_B, d_{cp} – зовнішній, внутрішній і середній діаметри пружного елемента відповідно; h – товщина пружного елемента.

Задавшись величиною d_{cp} виходячи з мінімальності радіуса стрижневого пружного елемента, одержимо товщину пружного елемента в залежності від чутливості давача:

$$h = \frac{1}{S_D} U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{nC_z S}{\pi d_{cp} E}. \quad (2.5)$$

Дуже часто з метою уніфікації розмірів пружного елемента задають не величину середнього діаметра, а величину зовнішнього діаметра, тоді внутрішній діаметр з (2.4) становить:

$$d_B = \sqrt{d_3^2 - \frac{1}{S_D} U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{4nC_z S}{\pi E}}. \quad (2.6)$$

Чутливість давача сили з кільцевим пружним елементом дорівнює:

$$S_D = \frac{U_{вих}}{F_x} = U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{nC_z S r_0}{b h^2 E}, \quad (2.7)$$

де r_0 – середній радіус кільця; b – ширина кільця; h – товщина кільця. Тоді товщина кільця для заданої чутливості обчислюється таким чином:



$$h = \sqrt{\frac{I}{S_D} U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{n C_z S r_0}{b E}}.$$

Для уніфікації розмірів кільця часто задаються внутрішнім діаметром. Тоді товщину кільця для заданого внутрішнього діаметра визначають з (2.7) після заміни $r_0 = 0,5d_g + 0,5h$.

Аналогічно можуть бути отримані вирази для розрахунку товщини мембранного і балкового пружних елементів давача. Для давача сили з мембранним пружним елементом товщину мембрани розраховують за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{I}{S_D} U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{n C_z S}{E}};$$

а для давача сили з балковим пружним елементом –

$$h = \sqrt{\frac{I}{S_D} U \frac{k}{(k+1)^2} \frac{n C_z S l}{b E}}.$$

Варто звернути увагу на те, що напруга живлення має бути такою, щоб струм тензорезистора не перевищував допустимого, а перетин пружного елемента таким, щоб відносна деформація його знаходилася в межах $(1,0 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$, що зазвичай задають для пружних елементів давачів. Тому має бути розрахована фактична відносна деформація пружного елемента за функціями перетворення пружних елементів, і, якщо вона виявиться за межами 0.001... 0.0015, то необхідно відповідним чином змінити середній діаметр для стрижневого пружного елемента, ширину – для кільцевого і балкового пружних елементів. Перевищення відносної деформації в мембранному пружному елементі понад рекомендованих свідчить про недоцільність застосування такого пружного елемента для заданої межі вимірювання давача.

Якщо розроблювальний давач сили буде використовуватися з калібруванням, то калібрований опір розраховують за формулою:

$$R_K = \frac{R + 2R_L}{n C_z S F_x} S_{o\sigma} E,$$

де R – опір плеча, до якого підключений калібрувальний опір; R_L – опір ліній, охоплених калібрувальним опором; F_x – вимірювана сила; $S_{o\sigma}$ – узагальнений переріз пружного елемента. Для



стрижня $S_{об} = S_{ст}$, для кільця $S_{об} = bh^2/r_0$, для мембрани

$S_{об} = h^2$, для балки $S_{об} = bh^2/l$.

При розрахунку допоміжних деталей і вузлів необхідно враховувати, що всі приєднані до пружного елемента деталі знижують власну частоту давача, тому їхня маса має бути мінімальною. До таких деталей відносяться силові і допоміжні подушки, тверді ділянки пружного елемента, штоки й інші деталі, що створюють навантаження на пружний елемент. При розрахунку притисної пружини зусилля притиску необхідно вибирати в залежності від можливих вібраційних навантажень з таким розрахунком, щоб при вібраціях між силовою подушкою і пружним елементом не порушувався силовий контакт. При виборі розмірів хвостовика мають бути враховані напруги, що виникають при дії на давач бічного навантаження. Вплив бічних навантажень необхідно враховувати також при виборі розмірів жорсткої ділянки кільцевого пружного елемента.

При призначенні допусків на деталі необхідно враховувати, що на розміри пружного елемента, які визначають чутливість давача, допуск має бути мінімальним. Особливо це відноситься до «тонких» пружних елементів. Виконання товщини такого елемента навіть за другим класом точності приводить до розкиду чутливості, що досягає 20%. У деяких випадках питання чистоти обробки матеріалу можуть мати вирішальне значення. Так, наприклад, поверхні під установку тензорезисторів повинні мати високий (до 10) клас чистоти обробки. Для кращого приклеювання тензорезистора ці поверхні піддають додатковій обробці шліфуванням та поліруванням. Високий клас обробки повинні мати і поверхні, що сполучаються: контактні площадки, поверхня «пружний елемент – допоміжна подушка» і т.д. Ці поверхні, крім гарної чистоти, повинні бути і точними. В іншому випадку можуть виникнути значні похибки від нелінійності й гістерезису.

Слід відзначити, що тензорезисторні давачі можуть бути виконані досить точними. В залежності від умов експлуатації основна похибка давачів 0,5–1,5%, причому основну частку похибки складає температурна похибка, що досягає 0,3% на 10 °C зміни температури. Іншими істотними складовими основної похибки давача є нелінійність (до 0,3%), гістерезис (до 0,2%), плин нуля від навантаження (до 0,2%), нестабільність показів від орієнтації і часова



2.3. Порядок роботи.

1. Вибрати тип та кількість тензорезисторів і схему їх вмикання в електричне коло.
2. Розрахувати всі необхідні параметри давача.
3. В середовищі КОМПАС накреслити принципову схему давача.

2.4. Порядок виконання роботи.

1. Виходячи з умов конструкторської задачі вибрати тип тензорезисторів та мостову схему.
2. Визначити напругу живлення мостового кола.
3. Визначити статичну чутливість давача.
4. Розрахувати потужність допоміжних елементів електричного кола.
5. Відкрити програму КОМПАС і накреслити принципову схему давача, вказавши номінал і тип елементів схеми.

2.5. Приклад розв'язання.

Спроекувати тензометричний давач деформацій, визначити коефіцієнт статичної чутливості.

Нехай виріб або пружний елемент дозволяє наклеювати на нього два тензорезистори з габаритними розмірами $l = 2 \text{ см}$ і $h = 1 \text{ см}$. Допустима питома поверхня охолодження при наклейці тензодавачів на метал $\sigma_0 = 2 \text{ см}^2 / \text{Вт}$. Вибираємо узгоджений міст з двома робочими плечима, в якості яких виступають константанові тензорезистори (рис. 2.3, а). Нехай опори моста однакові:

$$r_1 = r_2 = r_{o1} = r_{o2} = r_n = 1,7 \text{ кОм}.$$

Напругу живлення моста знаходимо за формулою $\sigma_0 = \frac{S}{P_0}$, де

$S = 2hl$ – поверхня охолодження давача, см^2 ;

$P_0 = \frac{U^2}{4r_0}$ – потужність, розсіювана в давачі, Вт .

Підставляючи ці вирази в основну формулу, одержимо:

$$U = \sqrt{\frac{8hl \cdot r_0}{\sigma_0}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{2}} = 116 \text{ В}.$$



Приймаємо $U = 110\text{ В}$, що позитивно позначається на збільшенні σ_0 .

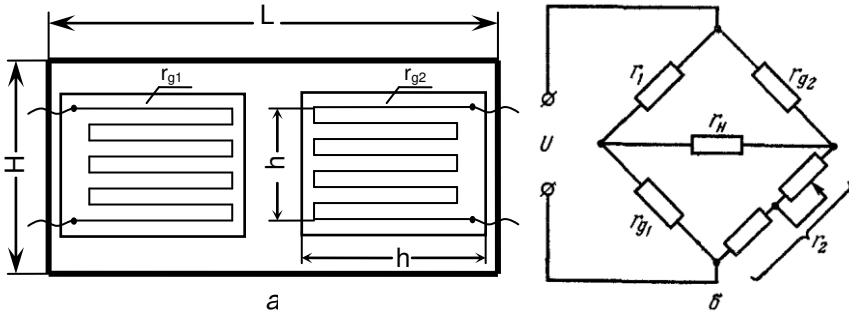


Рис. 2.3. Схема наклейки тензодавачів на виріб (а) і мостова схема їх включення (б)

Коефіцієнт статичної чутливості моста без врахування опору коротких сторін петель тензодавача визначають за формулою:

$$k = \frac{l}{4} n \frac{r_H}{r_H + r_\delta} \bar{k} U,$$

де $\bar{k} = \frac{\Delta r / r_\delta}{\Delta l / l}$ – відносний коефіцієнт чутливості давача (для кос-

тантана $\bar{k} = 2,2$);

n – число активних плечей моста ($n = 1, 2$ чи 4);

Δr , Δl – зміна опору і деформація довгих сторін давача. Отже,

$$k = \frac{1}{4} \cdot 2 \frac{1,7 \cdot 10^3}{(1,7 + 1,7) \cdot 10^3} \cdot 2,2 \cdot 110 = 60,5\text{ В},$$

при деформації $\Delta l = 1\text{ мм}$, чи $0,605\text{ В}$ на 1% відносної деформації.

Потужність, що виділяється в одному плечі моста,

$$P_\delta = \frac{U^2}{4 \cdot r_\delta} = \frac{110^2}{4 \cdot 1,7 \cdot 10^3} = 1,78\text{ Вт},$$

а всією схемою $P \approx 4P_\delta = 7,15\text{ Вт}$.

Отже, опори r_1 , r_2 мають бути потужності не менше 2 Вт .

Вихідні дані згідно варіантів наведені в таблиці 2.1.



Завдання до лабораторної роботи №2 згідно варіантів

№ п/п	L , см	H , см
1	4	1
2	6	2
3	8	3
4	2	4
5	3	5
6	5	6
7	7	1
8	4	2
9	6	3
10	8	4
11	2	5
12	3	6
13	5	1
14	7	2
15	4	3
16	6	4
17	8	5
18	2	6
19	3	1
20	5	2

В таблиці 2.1 L, H – габаритні розміри виробу або пружного елемента давача.

2.6. Контрольні питання.

1. За яким принципом працюють тензорезистори?
2. Яка максимально допустима потужність розсіювання тензорезисторів?
3. З яких міркувань проводиться вибір пружного елемента в тензорезистивних давачах?
4. Як визначається напруга живлення вимірювального моста?



Робота 3. Проектування індуктивного давача.

3.1. Мета роботи.

Вивчити методику проектування індуктивних давачів.

3.2. Теоретичні відомості.

Індуктивні давачі служать для безконтактного отримання інформації про переміщення робочих органів машин, механізмів, роботів і т.ін. та перетворення цієї інформації в електричний сигнал.

Принцип дії індуктивного давача оснований на зміні індуктивності обмотки на магнітопроводі залежно від положення окремих елементів магнітопроводу (якоря, осердя та ін.). У таких давачах лінійне або кутове переміщення X (вхідна величина) перетвориться в зміну індуктивності (L) давача. Такі здавачі застосовуються для вимірювання кутових і лінійних переміщень, деформацій, контролю розмірів і т.ін.

У найпростішому випадку індуктивний давач є котушкою індуктивності з магнітопроводом, рухомий елемент якого (якір) переміщається під дією вимірюваної величини.

Індуктивний давач розпізнає і відповідно реагує на всі струмопровідні предмети. Індуктивний давач є безконтактним, не вимагає механічного впливу, працює безконтактно за рахунок зміни електромагнітного поля.

Переваги:

- немає механічного зносу, відсутні відмови, пов'язані із станом контактів;
- відсутній брязкіт контактів і помилкові спрацьовування;
- висока частота перемикачів до 3000 Гц;
- стійкий до механічних дій.

Недоліки:

- порівняно мала чутливість;
- залежність індуктивного опору від частоти напруги живлення;
- значна зворотна дія давача на вимірювану величину (за рахунок тяжіння якоря до осердя).

На рис. 3.1 представлений простий індуктивний перетворювач, що складається з нерухомого магнітопроводу 2, на якому розташована котушка 4 з числом витків W_1 , і рухомої пластини 1. Пластина 1 і магнітопровід 2 виконані з феромагнітного матеріалу.



Послідовно з обмоткою 4 включений міліамперметр 3. До кінців обмотки подана напруга змінного струму $U = const$.

Індуктивність обмотки:

$$L = \frac{W\Phi}{I}, \quad (3.1)$$

де Φ – магнітний потік; I – струм, що протікає по котушці.

Величину магнітного потоку можна визначити використовуючи вираз (3.2):

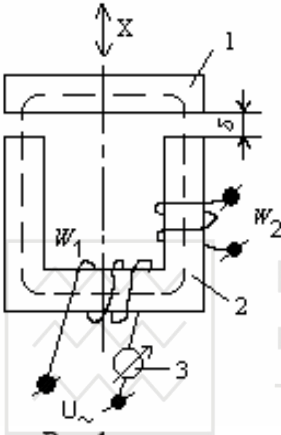


Рис. 1.

$$\Phi = \frac{IW_1}{Z_M} = \frac{IW_1}{R_{м.ст.} + R_\delta + jX_M}, \quad (3.2)$$

де Z_M – магнітний опір магнітопроводу; W – число витків котушки; $R_{м.ст.}$ – магнітний опір ділянок з сталі; R_δ – магнітний опір повітряних ділянок магнітопроводу; X_M – реактивна складова опору магнітного кола, обумовлена втратами на вихрові струми і гістерезис.

З врахуванням (3.2) рівняння (3.1) прийме вигляд:

$$L = \frac{W^2}{Z_M} = \frac{W_1^2}{R_{м.ст.} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} + jX_M}, \quad (3.3)$$

де δ – величина повітряного зазору між рухомою і нерухомою частинами магнітопроводу; S – площа повітряного зазору; μ_0 – магнітна проникність повітря;

$$R = \frac{l_{M1}}{\mu S_{m1}} + \frac{l_{M2}}{\mu S_{m2}}, \quad (3.4)$$

l_{M1}, l_{M2} – довжина нерухомої і рухомої частин магнітопроводу, визначена по середній лінії; μ – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу; S_{m1}, S_{m2} – площа перетину нерухомої і рухомої частин магнітопроводу.

Якщо рухомий магнітопровід жорстко з'єднати з об'єктом, переміщення X якого вимірюється (рис. 3.1), то при зміні X змінюється і



величина повітряного зазору δ , що приведе до зміни магнітного опору Z_M , а отже й індуктивності L котушки (див. (3.3)).

При зміні індуктивності котушки буде змінюватися і її індуктивний опір $X_L = \omega L$, а отже і величина струму, що протікає по котушці, матиме вигляд:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (3.5)$$

де R – активний опір кола; ω – частота змінної напруги, що живить котушку перетворювача.

Якщо на магнітопровід (рис. 3.1) помістити не одну, а дві обмотки з числом витків W_1 і W_2 відповідно, то при зміні магнітного опору магнітопроводу Z_M буде змінюватися взаємна індуктивність M між обмотками:

$$M = \frac{W_1 W_2}{Z_M}. \quad (3.6)$$

Перетворювачі, що перетворюють значення змінного механічного переміщення X в значення взаємної індуктивності обмоток, називаються трансформаторними.

Очевидно, що із зростанням зазору δ величина Z_M зростатиме, взаємна індуктивність M буде зменшуватися, отже буде зменшуватись і величина ЕРС, що наводиться в обмотці W_2 .

Перетворювач, зображений на рис. 3.1, називається перетворювачем із замкненим магнітним колом або перетворювачем з малим повітряним зазором. Вимірюване переміщення X_{max} таких перетворювачів зазвичай лежить в межах 1...5 мм.

На рис. 3.2 представлений перетворювач з розімкненим магнітним колом. Він представляє собою котушку 1, усередині якої може переміщатися осердя 2, виконане з магнітно-м'якого матеріалу.

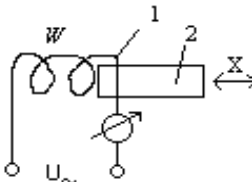


Рис. 2.

Осердя з'єднане з об'єктом, переміщення X якого вимірюється. Переміщення осердя викликає зміну індуктивності котушки. Такий тип перетворення застосовується для вимірювання переміщень X_{max} від 5 до 100 мм.

Для вищерозглянутих перетворювачів характерно, що опір маг-



і реактивна складова опору магнітного кола X_M набагато менше, ніж опір повітряної ділянки магнітопроводу, тобто

$$R_\delta \gg R_{m.ct.} \text{ і } R_\delta \gg |X_M|.$$

У зв'язку з цим, рівняння (3.3) в першому наближенні можна представити у вигляді:

$$L = \frac{W_I^2 \mu_0 S}{2\delta}. \quad (3.7)$$

З рівняння (3.7) видно, що індуктивність L та індуктивний опір котушки W_I при збільшенні зазору δ змінюються за гіперболічним законом (рис. 3.3), тобто функція перетворення нелінійна, що утруднює практичне застосування таких перетворювачів у вимірювальних приладах.

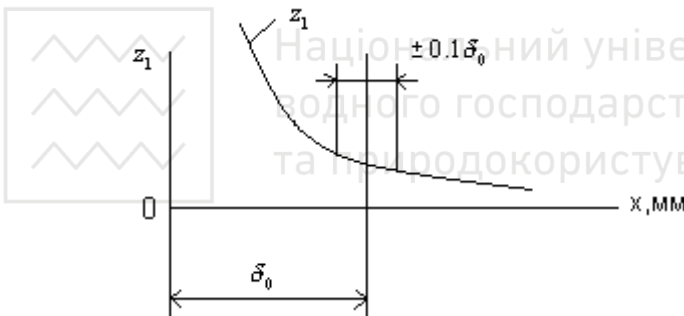


Рис. 3.3. Залежність комплексного опору обмотки індуктивного перетворювача від величини повітряного зазору

На рис. 3.3 представлена залежність комплексного опору z_I обмотки W_I індуктивного перетворювача від величини повітряного зазору δ_0 . Для зменшення похибки нелінійності робочий діапазон вимірюваних переміщень обмежують величиною $x = \pm 0,1\delta_0$, де δ_0 – початкове значення повітряного зазору в магнітному колі. У цьому діапазоні функцію перетворення $z_I = \varphi(\delta)$ з похибкою порядку 1% можна апроксимувати прямою лінією.

Конструкції індуктивних давачів досить різні, проте всі вони зводяться до чотирьох різновидів: перетворювачі із змінною довжиною повітряного зазору, перетворювачі плунжерного типу, зубчаті пере-



творювачі та перетворювачі з розподіленими параметрами.

Найчастіше застосовують давачі (див. рис. 3.4) із змінним зазором (а) і змінною площею зазору (б). Перші використовуються для вимірювань малих переміщень (від часток мкм до 3...5 мм); другі – для переміщень від 0,5 до 15 мм. Для вимірювання переміщень в малопотужних пристроях, наприклад, в стрілочних вимірювальних приладах, застосовують індуктивні давачі, котушки яких живляться від джерела струму високої частоти (5...50 МГц) або служать обмотками височастотних коливальних контурів.

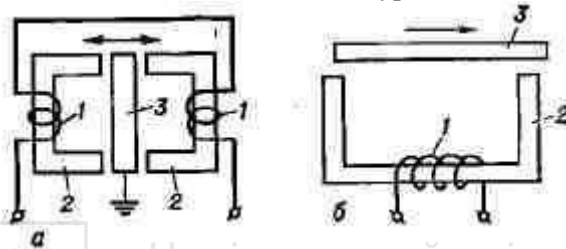


Рис. 3.4. Схема конструкції індуктивного давача: а – із змінним повітряним зазором; б – із змінною площею повітряного зазору; 1 – котушка індуктивності; 2 – осердя; 3 – якір

3.3. Порядок роботи.

1. Ознайомитись з особливостями проектування індуктивних давачів.
2. Визначити технічні параметри індуктивного давача сили, виходячи з умов технічної задачі.
3. В середовищі КОМПАС накреслити індуктивний давач сили з розрахованими параметрами.

3.4. Порядок виконання роботи.

1. Визначити площу намотування магнітопроводу давача.
2. Визначити число витків обмотки.
3. Визначити середню довжину витка.
4. Визначити довжину і активний опір намотувального проводу.
5. Визначити чутливість давача.
6. Визначити максимальний струм в давачі і зробити висновок про його допустимість.
7. Запустити програму КОМПАС.
8. Накреслити в середовищі КОМПАС розрахований давач з усіма необхідними розмірами.



3.5. Приклад розв'язання.

Розрахувати параметри і характеристику індуктивного давача, зображеного на рис. 3.5, а, при зміні повітряного зазору δ від 1 до 10 мм під дією сили F так, щоб передавальна функція на цьому проміжку мала лінійний характер. Напряга живлення $U_{\text{ж}} = 24 \text{ В}$. Розміри магнітної системи такі: $a = b = c = 1 \text{ см}$, $h = 2 \text{ см}$ (рис. 3.5, б). Як вторинний прилад використовується міліамперметр змінного струму. При розрахунку дозволяється знехтувати магнітним опором магнітопроводу й опором міліамперметра.

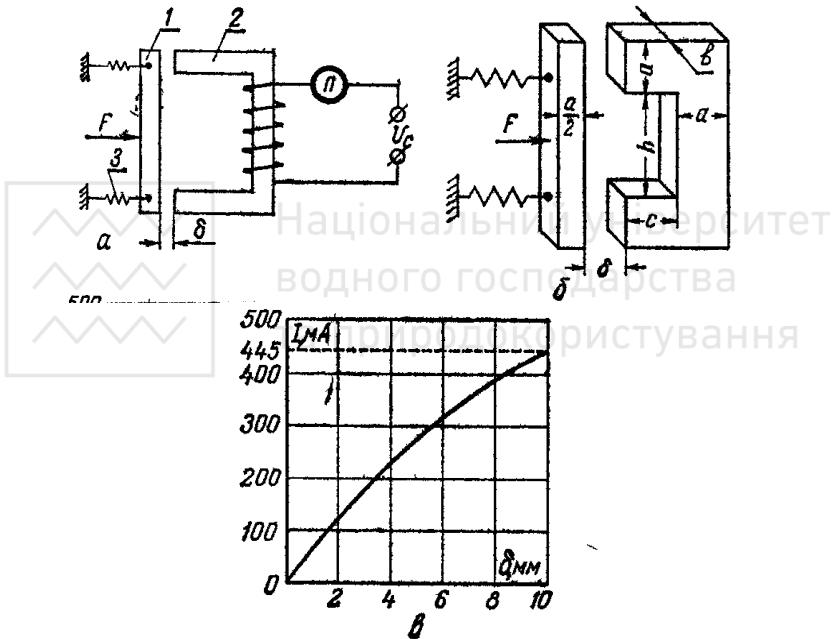


Рис. 3.5. Індуктивний площинний давач: а – схема; б – розміри магнітопроводу; в – статична характеристика

На рис. 3.5 введено такі позначення: 1 – рухомий якір; 2 – нерухомий магнітопровід; S – пружина.

Площа вікна намотування з урахуванням площі каркаса обмотки, товщина якого дорівнює 0.1 см, обчислюється так:

$$Q = hc - 0,1(h + 2c) = 2 \cdot 1 - 0,1(2 + 2) = 1,6 \text{ см}^2.$$

Визначаємо число витків обмотки. Приймаємо, що обмотка ви-



конується провідом марки ПЕВ діаметром $d = 0,49 \text{ мм}$, для якого з довідкових таблиць знаходимо коефіцієнт заповнення $f_0 = 0,5 \div 0,6$.

Число витків обмотки становить:

$$N = f_0 \frac{Q}{q} = 0,55 \frac{1,6}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,049^2} \approx 468,$$

де q – площа поперечного перерізу проводу, см^2 .

Приймаємо $N = 460$ витків.

Активний опір обмотки обчислюється таким чином:

$$r = \rho \frac{l_{cp} N}{q} = 0,0175 \cdot \frac{0,08 \cdot 460}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,49^2} = 34,2 \text{ Ом},$$

де l_{cp} – середня довжина витка, яка дорівнює:

$$l_{cp} = 2(c+a) + 2(c+b) = 2 \cdot 2 + 2 \cdot 2 = 8 \text{ см}.$$

Визначаємо індуктивність L та індуктивний опір давача:

$$L = \frac{2\pi N^2 S \cdot 10^{-5}}{\delta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 460^2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-5}}{\delta} = \frac{1,33}{\delta} \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$x = \omega \cdot L = 314 \cdot \frac{1,33}{\delta} \cdot 10^{-3} = \frac{0,418}{\delta} \text{ Ом},$$

де S – перетин магнітопроводу, м^2 ; $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота.

Знаходимо залежність струму I_n від повітряного зазору:

$$I_n = \frac{U_c}{\sqrt{r^2 + (\omega \omega L)^2}} = \frac{24}{\sqrt{34,2^2 + \left(\frac{0,418}{\delta}\right)^2}} \text{ (А)}.$$

Задаючись значеннями δ від 0 до 0.01 м (через кожні $\Delta\delta = 0,001 \text{ м}$), визначаємо відповідні значення I_n , а потім будуємо статичну характеристику (рис. 3.5, в).

$\delta, \text{ мм}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_n, \text{ А}$	0	57	114	168	218	284	312	350	385	415	445

Чутливість давача без врахування активного опору становить:



$$k_{\phi} = \frac{dI_n}{d\delta} = \frac{U \cdot 10^5}{2\pi \cdot N^2 \omega S} = \frac{24 \cdot 10^5}{6,28 \cdot 460^2 \cdot 314 \cdot 10^{-4}} = 57 \text{ A/м.}$$

Максимальна густина струму в обмотці давача розраховується як:

$$\Delta = \frac{I_n}{q} = \frac{0,445}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,49^2} = 2,36 \text{ A/мм}^2.$$

Отже, густина струму знаходиться в допустимих межах.

Вихідні дані згідно варіантів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Завдання до лабораторної роботи №3 згідно варіантів

№ п/п	<i>a</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>c</i> , мм	<i>h</i> , мм	<i>U_{жс}</i> , В
1	10	20	15	20	12
2	20	30	25	10	24
3	15	25	10	15	36
4	30	10	20	30	12
5	25	15	10	25	24
6	10	15	20	25	36
7	15	20	10	30	12
8	10	30	15	10	24
9	20	25	30	15	36
10	25	30	20	10	12
11	30	10	25	20	24
12	10	15	30	25	36
13	20	15	30	10	12
14	15	20	15	10	24
15	20	10	25	15	36

3.6. Контрольні питання.

1. Які Ви знаєте типи індуктивних давачів?
2. Яким чином визначають число витків в індуктивному давачі?
3. За яким принципом працюють індуктивні давачі?
4. Якого максимального значення може досягати густина струму в обмотці індуктивного давача?



Робота 4. Проектування ємнісного давача.

4.1. Мета роботи

Вивчити методику проектування ємнісних давачів.

4.2. Теоретичні відомості

Ємнісний давач являє собою конденсатор, в якому зміна відстані між пластинами (рис. 4.1, а), площі перекриття пластин або діелектричної проникності діелектрика, розташованого між пластинами (рис. 4.1, б), перетворюється в зміну ємності.

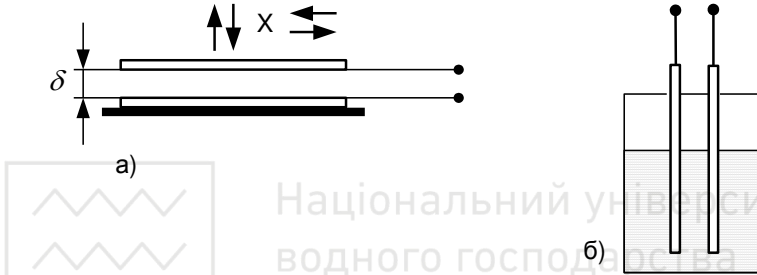


Рис. 4.1. Основні типи ємнісних перетворювачів

Ємнісні давачі можна розділити на три групи в залежності від вибраної класифікаційної ознаки:

- за призначенням: давачі кутового та лінійного переміщення; давачі рівня та лінійних розмірів; давачі концентрації та вологості; давачі температури; давачі посилень;

- за конструктивним виконанням: з плоскопаралельними пластинами конденсатора; з циліндричною формою конденсатора; з наявністю діелектрика між пластинами; без діелектрика;

- за типом змінного параметра конденсатора: зі змінною площею перекриття пластин; зі змінним зазором між обкладинками конденсатора; зі змінною діелектричною проникністю.

Ємнісні давачі працюють на змінному струмі. Принцип їх дії оснований на зміні ємності конденсатора під дією вхідного сигналу (електричного або механічного) об'єкту управління.

На ємність конденсатора можуть впливати зміна величини зазору між пластинами, зміна площі перекриття пластин, а також зміна діелектричної проникності речовини, що знаходиться в зазорі між обкладинками конденсатора.



Вибір змінного параметра конденсатора залежить від характеру

вхідного сигналу, тобто від величини, яку необхідно виміряти. Так, при вимірюванні кутових переміщень в якості змінного параметра давача доцільно вибирати площу перекриття пластин.

При вимірюванні лінійного переміщення в якості змінного параметра конденсатора можна вибрати величину повітряного зазору, однак статична характеристика давача буде нелінійною. Тому такі давачі слід використовувати в тих випадках, коли діапазон зміни вхідного сигналу відповідає порівняно невеликій ділянці статичної характеристики, на якій її можна вважати лінійною. На практиці для таких давачів величина зміни переміщення не має перевищувати 1 мм. При вимірюванні порівняно великих лінійних переміщень в якості змінного параметра конденсатора доцільно використовувати площу перекриття пластин.

Статична характеристика двотактного ємнісного давача являє собою лінійну залежність. При зміні напрямку переміщення середньої пластини фаза вихідної напруги змінюється на 180° по відношенню до фази вхідної напруги давача, яка є опорною. Підключення навантаження приводить до спотворення лінійності, однак при малих значеннях переміщення характеристику з достатньою точністю можна вважати лінійною.

Величинами, які впливають на ємність, можуть бути механічне переміщення, яке змінює зазор або площу перекриття пластин, температура або склад діелектрика, які впливають на абсолютну діелектричну проникність діелектрика, і т.і. В цьому випадку ємнісний давач може працювати або на постійному струмі (в режимі заданої напруги або заданого заряду), або на змінному струмі (на носійній частоті).

Давачі, ємність яких змінюється під дією сили електростатичного притягнення, працюють у вимірювальних механізмах вольтметрів та в давачах врівноваження в якості оберненого перетворювача. При вимірюванні неелектричних величин, наприклад, переміщення, сила вважається шкідливим ефектом, оскільки вона є реакцією приладу на об'єкт вимірювання. Однак необхідно зазначити, що інші перетворювачі, наприклад, індуктивні, утворюють ще більшу реакцію.

В ємнісних давачах з діелектриком кут діелектричних втрат значно більше і, крім того, може залежати від напруги, прикладеної до



давача, її частоти, температури та вологості. Зокрема, залежність від вологості є настільки суттєвою, що на цьому принципі будуються вимірювачі вологості зерна та інших біологічних матеріалів.

В деяких випадках при наявності діелектрика між електродами ємнісного давача доводиться враховувати те, що після поляризації діелектрики ще протягом деякого часу (0.1...2) с зберігають заряд (абсорбція), що приводить до виникнення залишкових напруг, які досягають декількох процентів від величини прикладеної напруги.

Крім діелектриків, які зберігають поляризацію деякий нетривалий час, існують ще спеціальні діелектрики, так звані електрети, поляризація яких зберігається тривалий час. Електрети використовуються в деяких ємнісних давачах для створення постійного електричного поля аналогічно тому, як для створення постійного магнітного поля використовуються постійні магніти.

Якщо ємнісний давач працює на змінному струмі, необхідно враховувати існуючу між електродами контактну різницю потенціалів, яка залежить від типу матеріалів, властивостей та чистоти поверхні й існує навіть між електродами, які виготовлені з одного матеріалу.

Зміна температури впливає як на зміну діелектричної проникності, так і на зміну геометричних розмірів, що виникає під дією лінійного розширення матеріалів. Середні температурні коефіцієнти лінійного розширення для найбільш поширених матеріалів складають: для металів $(15 \div 30) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для неорганічних діелектриків $(6 \div 10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для органічних діелектриків $(50 \div 100) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для плавленого кварцу $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Зміна діелектричної проникності для повітря дорівнює $\gamma_\epsilon = -2 \cdot 10^{-4} \%$, а для твердих діелектриків (плавлений кварц, слюда) $\gamma_\epsilon = 5 \cdot 10^{-4} \%$.

Деякі спеціальні матеріали, наприклад, титанат барію або сегнетова сіль, мають різко виражену залежність діелектричної проникності від температури. При температурах, які відповідають точкам Кюрі, діелектрична проникність збільшується в багато разів. Це явище використовується в ємнісних давачах для систем аварійної сигналізації.

Крім того, ємнісні давачі використовуються для вимірювання рівня, густини, товщини стрічки діелектриків, а також для вимірювання кута повороту валу.

Перевагою ємнісних давачів зі змінною площею перекриття пла-



стин є можливість при відповідному виборі форми рухомої та нерухомої пластин отримати задану функціональну залежність між зміною ємності та вхідним кутовим або лінійним переміщенням. Такі давачі використовуються для вимірювання переміщень, більших 1 мм. Для вимірювання малих переміщень (0.001...1) мм використовують ємнісні давачі зі змінним зазором.

Ємність більшості давачів лежить в межах (10...100) пФ, тому навіть на високих частотах їх вихідний опір великий ($10^3 \dots 10^7$) Ом, а вихідна потужність настільки мала, що ємнісні давачі працюють тільки з підсилювачами. Тому для виключення наводок ємнісні давачі з'єднують з підсилювачами за допомогою екранованого проводу або коаксіального кабелю. Екранований провід має порівняно велику ємність між жилою та заземленим екраном (порядку 50 пФ/м), а коаксіальний кабель має ємність приблизно 30 пФ/м та хвильовий опір 50 Ом.

Таким чином, ємність ліній зв'язку, якщо не забезпечити спеціальних заходів, шунтує давач, що приводить до значного зменшення його чутливості та точності. На практиці ємнісні давачі включаються за мостовими схемами.

Габаритні розміри ємнісних давачів визначаються конструктивними міркуваннями. Однак слід прагнути до збільшення ємності давача, тому що це зменшує його вхідний опір та спрощує вимоги, що ставляться до вимірювального кола та ізоляції давача. Для збільшення ємності перетворювача зазор між пластинами зменшують доти, доки це можливо за технологічними та конструктивними міркуваннями. На практиці величина зазору складає (100...500) мкм, а в деяких давачах навіть (10...20) мкм.

При таких малих величинах зазорів зміна їх в процесі роботи на (0.1...1) мкм вже не може викликати суттєвої зміни ємності, тому повітряний зазор має бути ретельно захищений від вологості, пилу та пару, здатного викликати корозію.

При проектуванні ємнісних давачів одним з найбільш важливих питань є спосіб ізоляції та кріплення електродів. Кращі властивості мають керамічні ізоляційні матеріали, однак їх поверхневий опір сильно залежить від забрудненості та вологості, тому при виборі кріплення деталей давача потрібно передбачати мінімальний вплив поверхневих опорів ізоляції та повного опору витоку.

Для того, щоб в залежності від температури не змінювалась відс-



тань між пластинами ємнісного давача, потрібно підібрати матеріали з відповідними температурними коефіцієнтами лінійного розширення. Температурна похибка нуля в значній мірі зменшується при використанні диференціальних перетворювачів.

Вихідний опір давача при заданій ємності зменшується при збільшенні частоти, тому частоту напруги живлення не слід вибирати менше 500 кГц, а більшість ємнісних давачів працюють на частотах ($10^6 \dots 10^7$) Гц.

Допустима напруга на ємнісному давачі визначається пробивною напруженістю. Для повітря при нормальному тиску та зазорах між пластинами (0.1...10) мм пробивна напруженість складає (2...3) МВ/м. При зазорах, менших 0.1 мм, можна не зменшувати напруженості, тому що при напругах, менших 350 В, повітряний проміжок зовсім не пробивається незалежно від довжини зазору. Для більшості діелектриків пробивна напруженість при електричному пробі при нормальній температурі складає (100...500) МВ/м. Однак допустима напруга конденсаторів з діелектриком визначається не тільки електричним, але й тепловим пробоем, при якому напруженість залежить від геометричних, теплових та електричних параметрів давача та зменшується при збільшенні частоти обернено пропорційно $\sqrt{\omega}$.

В деяких випадках вхідна напруга обмежена допустимими силами електростатичного притягнення між пластинами.

В диференціальному ємнісному давачі зі змінним зазором сили, що діють між парами пластин, спрямовані назустріч та повністю компенсують одна одну, якщо вхідний опір кола, включеного в діагональ моста, нескінченно великий та робочі ємності нічим не зашунтовані. В цьому випадку збільшення або зменшення приводить до пропорційного збільшення або зменшення напруги між відповідними пластинами: сила, що діє між ними, залишається незмінною, тобто різниця сил дорівнює нулю незалежно від переміщення.

Включення ємнісних давачів зі змінною діелектричною проникністю відбувається за мостовою або диференціальною схемами. Для збільшення чутливості давача використовується паралельне включення обкладинок конденсаторів, для яких створюються однакові умови, наприклад, у випадку вимірювання посиленя на давачі діє одна і та сама сила, при вимірюванні концентрації давачі знаходяться в одному середовищі і т.і.



Для збільшення точності ємнісних давачів використовується принцип електричної редукції, який полягає в тому, що за малий кут повороту вхідної осі перетворювача його вихідний параметр, який являє собою амплітуду або фазу вихідної напруги, змінюється на один період, тобто при повороті вхідної осі на 360° кількість періодів вихідного параметра буде дорівнювати передавальному числу електричної редукції.

При малих значеннях кутових переміщень вихідна напруга ємнісного редуктосина пропорційна куту повороту ротора, при цьому чутливість ємнісного редуктосина суттєво збільшується у порівнянні зі звичайним ємнісним давачем за рахунок наявності електричної редукції, передаточне відношення якої вибирається в межах $10 \dots 50$. Крім того, ємнісний двофазний редуктосин може використовуватися в системах передачі кутових положень механічно не зв'язаних валів разом з поворотним трансформатором, який виконує роль приймача. В цьому випадку при повороті ротора ємнісного редуктосина на кут, що дорівнює кроку його зубців, ротор поворотного трансформатора повернеться на повний оберт. Таким чином, без наявності механічного редуктора відбувається редукція при передаванні кута.

Перевагами ємнісних давачів є :

- висока чутливість та більша розділова здатність при малих значеннях амплітуди вхідного сигналу;
- простота конструкції, малі габарити та маса;
- незначна величина сили притягання між пластинами конденсатора, яку необхідно здолати при переміщенні рухомих пластин, що

визначається як $F_E = \frac{U_{ex}^2}{2} \cdot \frac{dC}{dx}$, де x – змінний параметр давача;

- відсутність реактивного моменту у ємнісних редуктосинів;
- відсутність рухомих контактів;
- висока швидкодія, тому що ємнісні давачі є практично безінерційними елементами з передавальною функцією $K(p) = k$, оскільки частота вхідної напруги давача на декілька порядків перевищує частоту зміни вхідного досліджуваного сигналу.

До недоліків ємнісних давачів слід віднести:

- порівняно низький рівень потужності вихідного сигналу;
- нестабільність характеристик при зміні параметрів навколиш-



– вплив паразитних ємностей.

Для зменшення втрат потужності вихідного сигналу використовують узгодження навантаження з внутрішнім опором схеми. Реактивний опір навантаження вибирають однаковим за величиною та протилежним за знаком внутрішньому реактивному опору.

4.3 Порядок роботи.

1. Визначити технічні параметри ємнісних давачів, виходячи з умов технічної задачі.
2. В середовищі КОМПАС накреслити ємнісні давачі з розрахованими параметрами.
3. В середовищі P-CAD розробити друковану електричну плату для ємнісного двотактного мостового давача.

4.4 Порядок виконання роботи.

1. Визначити чутливість за струмом площинного ємнісного давача переміщення для $\delta=1$ мм і її збільшення при зміні частоти напруги живлення $U = 220$ В від 50 кГц до 500 кГц. Побудувати залежність струму і чутливості давача від величини повітряного зазору. Давач виконаний у вигляді повітряного конденсатора зі змінною відстанню між пластинами, площа яких $S=113$ см² (рис. 4.2, а).

2. Вибрати параметри двотактної мостової схеми ємнісного давача з плоскими пластинами і повітряним діелектриком (рис. 4.2, а) і знайти залежність струму навантаження і чутливості давача від переміщення x . Напруга $U_{ж} = 220$ В, частота $f=50$ кГц, площа пластин $S=113$ см², а початковий повітряний зазор $\delta_0 = 1$ мм.

4.5. Приклад розв'язання.

Розв'язання 1. Визначаємо струм I_n конденсатора за формулою

$$I_n = \frac{U_c}{x} = \frac{U_c \omega \epsilon_0 S}{\delta},$$

де $x=1/\omega C$ – ємнісний опір давача; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – абсолютна діелектрична стала повітря;

а) при $f=50$ кГц

$$I_n = \frac{220 \cdot 2\pi \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0113}{\delta (м)} = \frac{6,9}{\delta (м)} \text{ мА.}$$

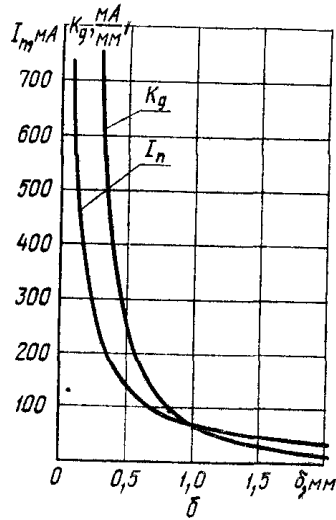
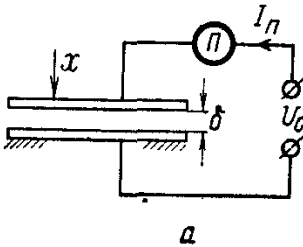


Рис. 4.2. Ємнісний давач переміщення (а) і його характеристики (б)
б) при $f=500$ кГц

$$I_n = \frac{69}{\delta} \text{ мА.}$$

Визначаємо чутливість давача при $\delta = 1$ мм за формулою

$$k_\delta = \frac{dI_n}{d\delta} = -\frac{U_c \omega \epsilon_0 S}{\delta^2}.$$

а) при $f = 50$ кГц

$$k_\delta = -\frac{6,9}{\delta^2} = -6,9 \text{ мА/мм};$$

б) при $f = 500$ кГц

$$k_\delta = -\frac{69}{\delta^2} = -69 \text{ мА/мм.}$$

Будуємо графіки залежностей струму I_n і чутливості k_δ від величини переміщення δ при $f = 500$ кГц (рис. 4.2, б).

Таким чином, чутливість ємнісного давача прямо пропорційна частоті джерела живлення і обернено пропорційна квадрату відстані між пластинами.

Розв'язання 2. Вибираємо параметри схеми з умови отримання рівноплечого моста і повної компенсації його реактивних опорів:



Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$x_c = x_L = r_H = 0,5 \quad r_1 = 0,5 \quad r_2 ,$$

де $x_L = \omega L$ – індуктивний опір дроселя;

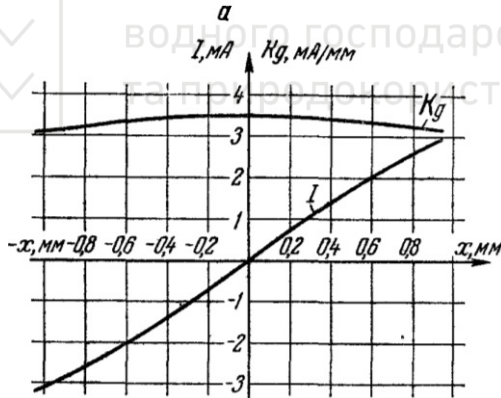
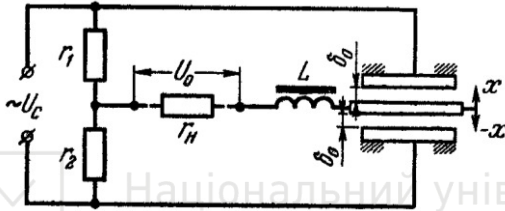
r_H , r_1 , r_2 – опори навантаження і плечей моста;

x_c – ємнісний опір давача:

$$x_c = \frac{1}{2\omega C_0} = \frac{1 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 6,28 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 100} = 15,9 \text{ кОм};$$

C_0 – первинна ємність плеча:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{\delta_0} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0113}{0,001} \Phi = 100 \text{ пФ}.$$



б

Рис. 4.3. Схема двотактного мостового ємнісного давача з плоскими пластинами (а) і його характеристики (б)

Приймаємо $r_H = 16 \text{ кОм}$; $r_1 = r_2 = r = 2 \text{ кОм}$ номінального потужністю 1 Вт. Фактична потужність:

$$\frac{U_1^2}{r_1} = \frac{U_2^2}{r_2} = \frac{\left(\frac{220}{2}\right)^2}{32 \cdot 10^3} = 0,38 \text{ Вт}.$$



$$L = \frac{16 \cdot 10^3}{\omega} = \frac{16 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^4} = 0,51 \text{ Гн.}$$

Визначаємо залежність вихідної напруги від величини повітряного зазору двотактного конденсатора, тобто від переміщення x середньої пластини. При цьому ємність верхнього проміжку

$$C_B = -\frac{\varepsilon_0 S}{\delta_0 - x}, \text{ а нижнього } C_H = \frac{\varepsilon_0 S}{\delta_0 + x}.$$

Напруга на виході в режимі холостого ходу ($r_H = \infty$):

$$U_0 = U_c \frac{x_H}{x_H + x_B} - U_c \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \text{ або } U_0 = \frac{C_B - C_H}{C_B + C_H} \cdot \frac{U_c}{2}$$

З урахуванням виразів для C_B і C_H одержимо $U_0 = \frac{1}{2} \frac{x}{\delta_0} U_c$, тоб-

то статична характеристика при $r_H = \infty$ лінійна на всьому діапазоні x від $-\delta_0$ до $+\delta_0$.

Залежність струму в навантаженні r_H від переміщення x

$$I = \frac{U_0}{r_H + Z_B},$$

де Z_B – внутрішній опір схеми:

$$Z_B = \frac{r}{2} + j \cdot \left[x_L - \frac{1}{\omega(C_B + C_H)} \right] = \frac{r}{2} + j \cdot \left(x_L - \frac{1 - \frac{x^2}{\delta_0^2}}{2\omega C_0} \right).$$

Тоді

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{\delta_0} \cdot \frac{U}{r_H + \frac{r}{2} + j \cdot \left(x_L - \frac{1 - \frac{x^2}{\delta_0^2}}{2\omega C_0} \right)}.$$

При $\delta_0 = 1 \text{ мм}$ $x_C = r_H = r/2 = x_L = 16 \text{ кОм}$ і

$$I = \frac{110x}{32 \cdot 10^3 + j \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot x^2} = \frac{0,11 \cdot x}{\sqrt{32^2 + 16^2 x^4}}, \text{ (А).}$$



Чутливість давача

$$k_d = \frac{dI}{dx} = \frac{0,11(32 + j \cdot 16x^2) - j \cdot 0,11x^2 \cdot 2 \cdot 16}{(32 + j \cdot 16x^2)^2},$$

$$\text{або } k_d = \frac{3,52 - j \cdot 1,76x^2}{(32 + j \cdot 16x^2)^2} = \frac{\sqrt{3,52^2 + 1,76^2 x^4}}{32^2 + 16^2 x^4}, \text{ (A/мм)}.$$

Графічно залежності струму I в навантаженні і чутливості k_d давача від переміщення x показані на рис. 4.3, б, а в табличній формі наведені нижче. Порівняння характеристик, наведених на рис. 4.2, б і рис. 4.3,б, дозволяє зробити висновок про те, що мостова схема давача забезпечує практично рівномірну шкалу вторинного приладу, що відбиває залежність $I=f(x)$, і постійну чутливість давача.

x , мм	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
I , мА	3,1	2,63	2,04	1,37	0,7	0	-0,7	-1,4	-2,04	-2,63	-3,1
k_d , $\frac{mA}{mm}$	30,1	30,27	30,35	30,4	30,43	30,4	30,4	30,4	30,3	30,27	30,1

Вихідні дані згідно варіантів наведені в таблицях 4.1 і 4.2.

Таблиця 4.1

Завдання до лабораторної роботи №4 згідно варіантів

№ п/п	δ , мм	U , В	f_1 , кГц	f_2 , кГц	S , см ²
1	1	110	10	100	100
2	0,5	36	30	100	150
3	1,5	220	50	100	50
4	2	110	50	600	75
5	0,25	24	100	400	140
6	0,75	36	60	300	120
7	1,25	110	30	300	80
8	1,75	127	30	400	130
9	2	220	30	500	160
10	0,5	24	30	600	110
11	1,5	36	60	600	70
12	2	110	60	400	60
13	0,25	127	60	100	170
14	0,75	24	60	300	180



Завдання до лабораторної роботи №4 згідно варіантів

№ п/п	δ_0 , мм	U, В	f, кГц	S, см ²
1	1	110	100	100
2	0,5	36	100	150
3	1,5	220	100	50
4	2	110	600	75
5	0,25	24	400	140
6	0,75	36	300	120
7	1,25	110	300	80
8	1,75	127	400	130
9	2	220	500	160
10	0,5	24	600	110
11	1,5	36	600	70
12	2	110	400	60
13	0,25	127	100	170
14	0,75	24	300	180

4.6. Контрольні питання.

1. За яким принципом працюють ємнісні елементи?
2. Як визначити ємність плоского повітряного конденсатора?
3. Для чого в схему давача включена котушка індуктивності?
4. Як чутливість ємнісного давача залежить від частоти напруги живлення?
5. Як залежить вихідна напруга давача від повітряного зазору конденсатора?



Робота 5. Розрахунок системи вимірювання температури.

5.1. Мета роботи

Ознайомитись з методикою розрахунку систем контролю температури.

5.2. Теоретичні відомості.

Практично всі технологічні процеси і ряд властивостей тіл залежать від температури. Вимірювати температуру можна лише непрямым шляхом, ґрунтуючись на залежності від температури таких фізичних властивостей тіл, які можливо безпосередньо виміряти. Ці властивості тіл називаються термометричними. До них належать: довжина, об'єм, термо-ЕРС, електричний опір тощо. В свою чергу речовини, які характеризуються термометричними властивостями, називаються також термометричними. Технічні засоби для вимірювання температури мають назву термометри.

Для створення термометра необхідно мати температурну шкалу. Найбільш розповсюдженими шкалами є шкали Фаренгейта, Ремюра, Цельсія і Кельвіна.

Результати вимірювання температури за цими шкалами записуються як: $t^{\circ}F$; $t^{\circ}R$; $t^{\circ}C$; $t^{\circ}K$.

Для перерахунку з однієї шкали в іншу використовують такі співвідношення:

$$t^{\circ}C = 1.25^{\circ}R = (5/9)(t^{\circ}F - 32) = T^{\circ}K - 273.15.$$

Межі вимірювання температур (найбільш використовуваними типами термометрів) наступні.

Термоелектричні термометри: від $200^{\circ}C$ до $2200^{\circ}C$.

Терморезистивні термометри: на основі металевих терморезистивних перетворювачів від $-260^{\circ}C$ до $1100^{\circ}C$; на основі напівпровідникових терморезистивних перетворювачів від $-240^{\circ}C$ до $300^{\circ}C$.

Манометричні термометри (газові і рідинні) від $-150^{\circ}C$ до $600^{\circ}C$.

Найбільш розповсюдженими для промислового вимірювання температури в межах від -260 до $1100^{\circ}C$ є платинові терморезистивні перетворювачі температури, так звані термометри опору (ТО).

Позитивною стороною їх є висока точність і часова стабільність, а недоліком – нелінійність функції перетворення, особливо в діапазоні низьких температур (від -260 до $0^{\circ}C$), в якому суттєво падає



чутливість.

При високих температурах (понад 1000°C) на стабільність ТО впливає випаровування платини, що обмежує їх застосування.

ТО з міді, нікелю та інших металів мають меншу часову стабільність, що зумовлює їх нижчий клас точності.

При вимірюванні низьких і середніх температур використовуються ТО з високим номінальним опором (від 100 до 500 Ом), а при вимірюванні високих температур – низькоомні ТО з номінальним опором від 10 до 1 Ом.

Увімкнення ТО у вимірювальне коло з допомогою з'єднувальних провідників впливає на точність вимірювання. Існують дво-, три- та чотирипровідні схеми увімкнення ТО у вимірювальне коло.

Для зменшення похибок, що з'являються через невідповідність опору з'єднувальних провідників їхньому градуовальному значенню, використовують термперетворювачі з трьома і чотирма відводами і відповідне їх увімкнення у мостове або компенсаційне коло. Потрібно також враховувати можливість додаткових похибок, які виникають від нагрівання ТО вимірювальним струмом. Для цього необхідно, щоб вимірювальний струм був таким, щоб викликана ним зміна опору не перевищувала 0,1%.

В практиці технологічних вимірювань температури з використанням терморезистивних перетворювачів широкого застосування набули, зокрема, мостові кола (зрівноважені і незрівноважені мости).

5.3 Порядок роботи.

1. Визначити технічні параметри термопар, виходячи з умов технічної задачі.
2. В середовищі КОМПАС накреслити термопару з розрахованими параметрами.
3. В середовищі P-CAD розробити друковану електричну плату для термопар за мостовою схемою включення.

5.4 Порядок виконання роботи.

Розрахувати статичні характеристики давачів температури, що складаються з двох термопар, для АСУ температурою на рівні $\theta_3 = 600^{\circ}\text{C}$ (рис. 5.1, а) і з однієї термопару для дистанційного вимірювання температури в межах від 0 до 700°C (рис. 5.1, б). Визначити



коефіцієнти статичної чутливості давачів.

Опір приладу Π (мілівольметра) дорівнює вхідному опору АСУ: $r_H=100$ Ом. Довжина сполучних проводів $l_n=20$ м. Вхідна температура може змінюватися в межах $\theta_B=500\div 700^\circ\text{C}$, температура при-
міщення, у якому встановлений прилад, $\theta_0=20^\circ\text{C}$.



Рис. 5.1. Схеми систем для вимірювання температури: а – АСУ температурою на заданому рівні; б – система дистанційного вимірювання температури; в – статичні характеристики перетворювача

5.5. Приклад розв'язання.

Для регулювання температури застосовується схема давача, у якій при відхиленні температури об'єкта θ_B від заданої θ_0 на виході схеми в режимі холостого ходу ($r_H = \infty$) з'являється напруга $U_0 = E_1 - E_2 = k(\theta_B - \theta_0)$, де E_1 і E_2 – термоелектрорушійні сили, відповідно пропорційні температурам θ_B і θ_0 ; k – коефіцієнт статичної чутливості термопар, В/град.

При наявності навантаження напруга на виході схеми

$$U_{\text{вих}} = I \cdot r_H = \frac{U_0}{r_H + r_{\Pi}} \cdot r_H = \frac{E_1 - E_2}{1 + \frac{r_{\Pi}}{r_H}}$$

де r_{Π} – опір сполучних проводів.

При дистанційних вимірюваннях проводи приєднують до клем магнітоелектричного мілівольметра Π (рис. 5.1, б), шкала якого тарується в градусах θ_B у відповідності зі статичною характеристикою $U_{\text{вих}} = f(\theta_B)$.



За максимальною температурою $\theta_b = 700^\circ\text{C}$ вибираємо з довідника (додаток 1) найбільш розповсюджену термопару хромель-копель з діаметром проводів 2 мм (перетин ($q=3,14 \text{ мм}^2$). Питомий опір копель $\rho_K=0,504$, а хромеля $\rho_x=0,61 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Опір сполучних проводів

$$r_K = \rho_R \frac{l_p}{q} + \rho_x \frac{l_p}{q} = (0,504 + 0,61) \frac{20}{3,14} = 7,1 \text{ Ом.}$$

Розрахуємо статичну характеристику давача (рис. 5.1, а) у межах відхилення $\Delta\theta_b = \pm 100^\circ\text{C}$. З огляду на те, що при $\theta_3 = 600^\circ\text{C}$ $E_2 = 49 \text{ мВ}$, за вищенаведеною формулою знаходимо:

$$\Delta U_{\text{вих}} = \frac{E_1 - 49}{1 + \frac{7,1}{100}} = \frac{E_1 - 49}{1,07} \text{ мВ.}$$

Для давача при $\theta_3 = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$ та $E_2 = 1,31 \text{ мВ}$

$$U_{\text{вих}} = \frac{E_1 - 1,31}{1,07} \text{ мВ.}$$

Графіки, що відбивають ці залежності, показані на рис. 5.1, в, а дані, за якими вони побудовані, приведені нижче.

$\theta_b, ^\circ\text{C}$	0	20	100	200	300	400	500	550	600	650	700
$E_1, \text{ мВ}$	0	1,31	6,95	14,65	22,9	31,48	40,15	44,5	49	53,4	57,7
$\Delta U_{\text{вих}}, \text{ мВ}$							-8,3	-4,2	0	4,1	8,2
$U_{\text{вих}}, \text{ мВ}$	-1,22	0	5,27	12,45	20,15	28,1	36,2	40,4	44,5	48,7	52,7

Статичний коефіцієнт чутливості давача (рис. 5.1, а):

$$k = \frac{d(\Delta U_{\text{вих}})}{d\theta_b} \approx \frac{\Delta U}{\Delta\theta_b} = \frac{8,2 + 8,3}{700 - 500} = 8,25 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град.}$$

Статичний коефіцієнт чутливості давача (рис. 5.1, б):

- мінімальний при $\theta_b = 0 \div 20^\circ\text{C}$

$$k_{\text{min}} = \frac{1,22}{20} = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град;}$$

- максимальний при $\theta_b = 600 \div 700^\circ\text{C}$

$$k_{\text{max}} = \frac{8,3}{700 - 600} = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град.}$$



Вихідні дані згідно варіантів наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Завдання до лабораторної роботи №5 згідно варіантів

№ п/п	$r_H, \text{Ом}$	$\theta_B, ^\circ\text{C}$	$\theta_3, ^\circ\text{C}$
1	10	1300	1100
2	30	300	200
3	50	1000	850
4	100	800	700
5	150	1300	1200
6	200	300	250
7	10	1000	900
8	30	800	650
9	50	1300	1000
10	100	300	150
11	150	1000	800
12	200	800	750
13	10	300	200
14	30	1300	950

Додаток 1. Значення температурного коефіцієнта напруги для різних сплавів термопар

Термопара	Максимальна температура, $^\circ\text{C}$	ТКН, $\text{мкВ}/^\circ\text{C}$
Мідь-копель	300	40,28
Хромель-алюмель	1000	40,28
Хромель-копель	800	60,48
Pt-Pt/Rh (платина-платино-родій)	1300	5,88

Значення питомого опору матеріалу термопар

Матеріал	Питомий опір, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$
Платина	0,11
Платинородій	0,19
Константан	0,48
Хромель	0,68
Алюмель	0,33
Копель	0,47