МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

РЕОСТАТНІ ТА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ

Магістрант гр.ЕП.м-92 Є.Ю.Желєзний

Науковий керівник,
канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач О.В.Пилипенко

Завідувач кафедри ЕЗПФ І. Ю. Проценко
д-р фіз.-мат. наук, професор

Суми-2020

РЕФЕРАТ

Об’єктом дослідження магістерської (дипломної) роботи є реостатні та тензорезистивні електронні системи перетворення сигналів.

Мета роботи ─ полягає у ознайомленні з методами застосування і використання реостатних та тензорезистивних електронних схем перетворення сигналів. А також технологією працездатності реостатних і тензорезистивних схем у промисловості.

При виконанні кваліфікаційної роботи, на основі отриманого аналізу різних систем перетворення сигналів і отриманих результатів, було з модульовано схеми досліджень реостатних і тензорезистивних датчиків за допомогою програмного забезпечення Multisim.

Використовуючи отриманні результати дослідження реостатних і тензорезистивних схем в Multisim були побудовані графіки і зроблені висновки в яких випадках краща чутливість і від чого зележить.

Робота викладена на 43 сторінках у тому числі включає 18 рисунків, 5 таблиць, список цитованої літератури із 13 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РЕОСТАТНІ ДАТЧИКИ, ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ, МОСТОВА СХЕМА ВИМІРЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ В MULTISIM, СИЛОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 4

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ, ПРИНЦИП ДІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ ДАТЧИКІВ..... 5

1.1. Датчики і прилади для вимірювання механічних величин..... 5

1.2. Силовимірювальні пристрої..... 5

1.3. Датчики тиску і різниці тисків..... 12

1.4. Перетворювачі кругових моментів (торсіометри)..... 16

1.6. Реостатні датчики переміщень..... 22

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ..... 27

2.1. Multisim електронна програма..... 27

2.2. Переваги і недоліки Multisim в порівнянні з іншими програмами..... 30

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ВІРТУАЛЬНІЙ ПРОГРАМІ MULTISIM..... 32

3.1. Досліждення тензорезистивних датчиків..... 32

3.2. Досліждення реостатних датчиків..... 38

ВИСНОВКИ..... 42

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 43

ВСТУП

Одним з напрямків науково-технічного прогресу є вдосконалення існуючих і створення нових засобів вимірювань, зокрема вимірювальних перетворювачів фізичних величин. Вимірювальні перетворювачі як засоби вимірювань, призначені для перетворень фізичних величин в зручні для вимірювань або подальших перетворень вихідні сигнали, знаходять все більш широке застосування як у вимірювальній техніці, так і в автоматизованих системах управління технологічними процесами [1,2].

Сьогодні тисячі фізичних величин, в тому числі параметрів технологічних процесів, доводиться вимірювати в різноманітних і часом найнесприятливіших умовах, що не мислимо без досконалих первинних вимірювальних перетворювачів. Подальший розвиток космічних досліджень, проникнення вимірювань в області надвисоких і наднизьких температур і тисків, частот і енергій, вивчення таємниць живого організму, боротьба з хворобами, охоронна навколишнього середовища і праці людини, при яких умови вимірювань стають ще більш складними, обумовлюють необхідність створення принципово нових засобів вимірювань і в першу чергу первинних вимірювальних перетворювачів [1,2].

Датчик-це перетворювач вимірюваної (контрольованої) фізичної величини в величину, зручну для подальшого перетворення або вимірювання. Датчик є обов'язковим елементом вимірювальних приладів, систем контролю і регулювання. Власне, без датчиків неможливі ні вимірювання, ні контроль, ні регулювання. Для побудови датчиків використовується значна (більше 500) кількість фізичних ефектів (принципів)[1].

Мета кваліфікаційної роботи полягала в проведенні літературного аналізу реостатних та тензорезистивних електронних системи перетворення сигналів та проведенні моделювання роботи таких систем.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ, ПРИНЦИП ДІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ ДАТЧИКІВ

1.1 Датчики і прилади для вимірювання механічних величин

З механічних величин, які найчастіше вимірюються, основними є механічні зусилля, що підрозділяються на зосереджені, зокрема, спрямовані лінійно (механічні сили) і обертальні (кругові моменти), а також розподілені зовнішні зусилля (тиск) і внутрішні розподілені зусилля, що виникають в тілі досліджуваного об'єкта (механічні напруги).

Діапазон вимірюваних механічних зусиль дуже великий. Зокрема, при наукових дослідженнях необхідно вимірювати сили починаючи від 10^{-5}—10^{-6} Н, а при промислових вимірах до 10^{9} Н. Внутрішні напруги в деталях різних конструкцій знаходяться в межах до 2000 МПа. Діапазон вимірювань тиску лежить в межах від 0 до майже 10^{10}—10^{11} Па, а поріг чутливості сучасних манометрів досягає 10^{-2} Па. Верхня межа вимірювань кругових моментів досягає 10^{9} Н·м[3].

1.2. Силовимірювальні пристрої

Переважна більшість силовимірювальних приладів (динамометрів) засноване на перетворенні вимірюваної сили в механічні напруги в матеріалі пружного елемента і його деформацію, які за допомогою тензорезистивних, індуктивних або інших датчиків перетворюються в електричний сигнал або зміна вихідного електричного параметра[3].

Залежно від значення вимірюваної сили в якості первинних перетворювачів можуть використовуватися стрижневі пружні елементи, пружні кільця, балкові пружні елементи. Перетворювачами динамометрів з механічними пружними перетворювачами сили в деформацію є, переважно, тензорезистивні перетворювачі, а вимірювальні ланцюги — мостові. Такі динамометри призначаються для вимірювань з похибкою 1—2 %. Отже, для

вимірювання сили F_x може бути використана схема з одним робочим і одним компенсуючим тензорезистором (рис. 1.1, б) [3].

Найпростішим і найпоширенішим методом вимірювань деформацій є так званий тензометричний метод, в якому в якості перетворювачів деформації використовують тензорезистори. Металеві тензорезистори застосовують для вимірювань відносних деформацій від 0,002 до 1─2 %, напівпровідникові ─ до 0,1─0,2%, навісні металеві ─ до 10 %, а еластичні (гнучкі каучукові трубки, заповнені електролітом) ─ до 30─50%. Тензорезистори практично безінерційні і використовуються для вимірювань, зокрема, змінних деформацій в діапазоні частот до 100 кгц.

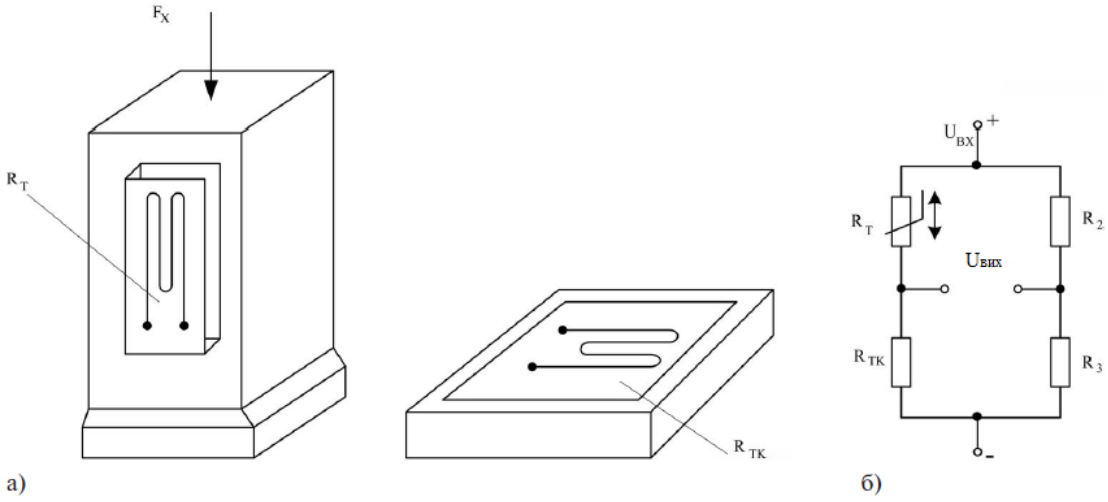

Рис. 1.1. Вимірювання сил за допомогою тензорезисторів[1]

Для вимірювання деформацій або величин, попередньо перетворених в деформацію пружного елемента, тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь. Для температур до 200 °С застосовують бакеліто-фенольні клеї (БФ), бакелітовий лак, а для більш високих температур ─ жаростійкий кремнійорганічний цемент і цемент на основі рідкого скла.

Особливістю приклеюваних тензорезисторів є те, що вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт. Тому дійсна функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки знаходять функцію перетворення аналогічного, так званого градуювального

тензорезистора з цієї партії. А оскільки властивості окремих тензорезисторів з певної партії, а також умови їх приклеювання в цілому дещо різні, то відзначається деяка неоднозначність дійсної і номінальної функцій перетворення. Досвід свідчить, що похибка від неідентичності функцій перетворення при приклеюванні тензорезисторів з досить однорідної партії не перевищує 1,5% [3]. Вихідним інформативним параметром тензорезисторів є зміна їх опору, і тому в більшості випадків вимірювальними ланцюгами тензорезистивних перетворювачів є мостові вимірювальні ланцюги. Тензорезистор може бути включеним в одне з плечей моста, в два плеча або мостовий ланцюг може бути складена повністю з тензорезисторів.

Оскільки відносна зміна опору тензорезисторів дуже мала (ε_R< 1%), то істотний вплив на результат вимірювань може мати температура навколишнього середовища. Отже, необхідно передбачити температурну компенсацію. Зокрема, якщо використовують Мостовий ланцюг з одним робочим тензорезистором (рис. 1.1, а), то для температурної компенсації необхідний інший неробочий тензорезистор $R_{TK} = R_0$, аналогічний робочому R_T, який був би в однакових температурних умовах з робочим. Тоді зміна опорів двох ідентичних (робочого і компенсаційного) тензорезисторів, викликане зміною температури навколишнього середовища при незмінному значенні вимірюваної деформації, не призводить до зміни вихідної напруги. Дійсно, якщо, наприклад ε_R= 0 і R_2= R_3= R

$$U_{вих} = U_{вх}\frac{R_{T_0}(1+\varepsilon_t)R - R_{T_0}(1+\varepsilon_t)R}{[R_{T_0}(1+\varepsilon_t)+R_{T_0}(1+\varepsilon_t)]2R} = 0 \qquad (1.1)$$

де R_{T_0} - опір тензорезистора при температурі 0°С; ε_t - температурний коефіцієнт опору тензорезистора.

Якщо такий мостовий ланцюг при відсутності вимірюваної деформації буде в рівновазі, тобто $R_t R_3 = R_2 R_{TK}$, то в результаті дії вимірюваної деформації і відповідно зміни опору робочого тензорезистора на ΔR_T

рівновага порушується, а вихідна напруга за умови, що внутрішній опір джерела живлення дуже малий, буде дорівнювати:

$$\mathrm{U_{вих}} = \mathrm{U_{вх}} \frac{\mathrm{R_{T_0}(1+\varepsilon_R)R_3 - R_2R_{TK}}}{\mathrm{[R_{T_0}(1+\varepsilon_R)+R_{TK}](R_2+R_3)}}; \quad (1.2)$$

де $\varepsilon_R = \Delta R_T / R_{T_0}$ — відносна зміна опору тензорезистора;

$R_T = R_{T_0}(1 + \varepsilon_R)$ — функція перетворення робочого тензорезистора. Для симетричного мосту, коли $R_{TK} = R_{T_0}$, а $R_2 = R_3$, отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = 0{,}25 U_{\text{вх}} \frac{\varepsilon_R}{1+0{,}5\varepsilon_R} \quad (1.3)$$

Оскільки відношення відносної зміни опору $\varepsilon_R = \Delta R_T / R_{T_0}$ до відносної деформації $\varepsilon_l = \Delta l / l$ характеризується коефіцієнтом відносної тензочутливості k, то залежність вихідної напруги від вимірюваної деформації запишеться як:

$$U_{\text{вих}} = 0{,}25 U_{\text{вх}} k \varepsilon_l \quad (1.4)$$

Звідки

$$\varepsilon_l = \frac{4}{k} \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \quad (1.5)$$

Дві пари диференціальних тензорезисторів, які утворюють повний тензометричний міст (мал. 1.2), забезпечують найкращу корекцію температурних похибок і в чотири рази збільшують чутливість

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} k \varepsilon_l \quad (1.6)$$

Якщо використовується блок з чотирьох ідентичних тензорезисторів, наклеєних на поверхню досліджуваного об'єкта так, що тензорезистори R_{T_1} і R_{T_3} (рис. 1.2, а) сприймають поздовжню деформацію, а R_{T_2} і R_{T_4} —

поперечну, то при їх включенні в містовий ланцюг (рис. 1.2, б) температурна похибка також буде компенсуватися, а вихідна напруга буде дорівнювати [3]:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R_{T_0}(1+\varepsilon_R)R_{T_0}(1+\varepsilon_R) - R_{T_0}(1-\mu\varepsilon_R)R_{T_0}(1-\mu\varepsilon_R)}{\left[R_{T_0}(1+\varepsilon_R) + R_{T_0}(1-\mu\varepsilon_R)\right]\left[R_{T_0}(1+\varepsilon_R) + R_{T_0}(1-\mu\varepsilon_R)\right]} \quad (1.7)$$

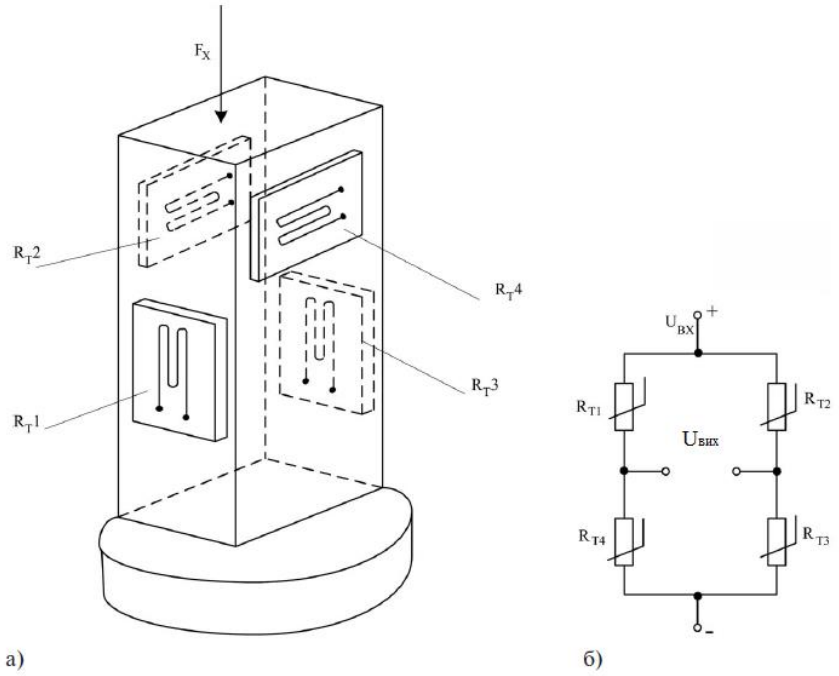

Рис. 1.2. Схема вимірювання сили з використанням стрижневого первинного перетворювача і чотирьох тензорезисторів[1]

Враховуючи, що для металевих тензорезисторів ε_R не перевищує 0,01, а коефіцієнт Пуассона μ = 0,24 — 0,4, будемо мати:

$$U_{\text{вих}} = 0{,}5U_{\text{вх}}(1+\mu)\varepsilon_R \quad (1.8)$$

Звідки

$$\varepsilon_l = \frac{\varepsilon_R}{k} = \frac{2}{(1+\mu)k} * U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} \quad (1.9)$$

При цьому використовуються регулювальний резистор для встановлення початкового значення діапазону вимірювань (найчастіше нульового значення вихідної напруги), температурозалежний резистор для

компенсації зміни чутливості схеми від зміни температури навколишнього середовища, резистор для регуляції і встановлення номінальної чутливості. Термозалежний резистор повинен мати хороший тепловий контакт з досліджуваним об'єктом (або перетворюючим пружним елементом), на якому наклеєні робочі тензорезистори. Для цього він приклеюється до досліджуваного об'єкта (пружного елемента) за допомогою електроізоляційного клею з хорошою теплопровідністю[4].

Якщо первинними перетворювачами сили (тиску) в деформацію є консольні (мембранні) елементи, то в якості робочих можна використовувати два ідентичних тензорезистора, наклеєні з протилежних сторін чутливого елемента так, що один сприймає деформацію розтягування, а інший деформацію стиснення, то можливо диференціальне їх включення в мостовий ланцюг (рис. 1.3). В цьому випадку температурна похибка також виключається, а чутливість мостового ланцюга збільшується вдвічі:

$$U_{\text{вих}} = 0{,}5U_{\text{вх}}k\varepsilon_l \tag{1.10}$$

Звідки

$$\varepsilon_l = \frac{2U_{\text{вих}}}{kU_{\text{вх}}} \tag{1.11}$$

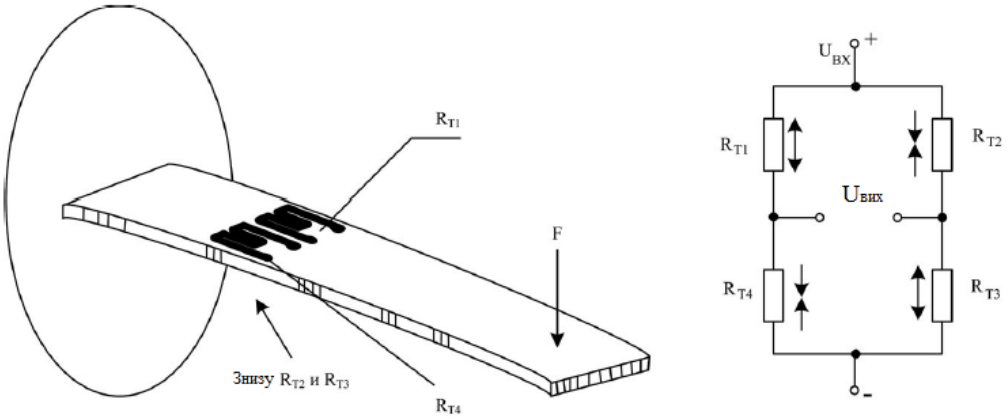

Рис. 1.3. Схема вимірювання сили з консольним пружнім перетворювачем і двома парами тензорезисторів[1]

Крім неврівноважених мостових ланцюгів в тензометрії можуть бути використані і врівноважені мостові ланцюги. Значення механічних сил за результатами вимірювань деформацій розраховуються виходячи зі співвідношення між вимірюваною силою F_x і деформацією ε_l. Зокрема, для пружного перетворювача у вигляді стрижня постійного перетину.

$$F_x = SE\varepsilon_l \tag{1.12}$$

де S-площа поперечного перерізу стрижня; E — модуль пружності матеріалу стрижня.

Для консольної балки рівномірного перетину

$$F_x = \frac{Eh^2b}{\sigma(l-x)}\varepsilon_l \tag{1.13}$$

де b, h, l — геометричні розміри балки; x — відстань від місця закріплення балки до середини тензорезистора.

Незважаючи на порівняно низьку точність (сумарна похибка вимірювання сили становить 2─3%), для вимірювань великих сил (10^5─10^6Н) у складних умовах широко застосовуються динамометри з магнітопружним перетворювальним елементом, які відрізняються простотою конструкції, високою надійністю. Магнітопружні перетворювачі виготовляють, переважно, диференціальними. Один з перетворювальних елементів є робочим, а ідентичний йому другий перетворювальний елемент, на який не діють вимірювальні зусилля, служить для компенсації початкової індуктивності робочого перетворюючого елемента, а також для компенсації впливу зовнішніх факторів, зокрема, температури навколишнього середовища, частоти джерела живлення.

Для вимірювань статичних і динамічних зусиль широко застосовуються п'єзоелектричні датчики.

Для вимірювання статичних зусиль використовуються датчики, п'єзоелемент яких збуджується на резонансній частоті. В якості вихідної величини таких датчиків може використовуватися їх резонансна частота [5] або вихідна напруга [4].

Резонансні п'єзодатчики з частотним виходом, як правило, виготовляються з кварцу і забезпечують досить високу точність [4, 5].

Датчики з п'єзокераміки менш точні. Датчики динамічних зусиль використовують прямий п'єзоефект. Частотний діапазон їх обмежений понад резонансної частоти п'єзоелемента. При використанні в якості навантаження так званих підсилювачів заряду Нижня частота датчика може становити одиниці і частки герц.

1.3. Датчики тиску і різниці тисків

Широкий діапазон вимірюваних тисків ─ від частинок Па до майже 10^{10} Па зумовив і велику різноманітність методів і засобів їх вимірювань. Значна частина методів заснована на попередньому перетворенні тиску в механічну напругу, деформацію або переміщення, за допомогою пружних перетворювальних елементів з подальшим вимірюванням механічної напруги, деформації або переміщення. В інших засобах використовуються фізичні ефекти, які дають можливість безпосередньо перетворювати вимірюваний тиск в електричну величину, наприклад, в заряд, як в п'єзоелектричних манометрах, або в зміну вихідного електричного опору в результаті баричного тензоефекту [3,6,7].

Залежно від характеру і значення вимірюваного тиску всі прилади для вимірювання тиску із загальною назвою Манометри поділяються на такі групи:

- барометри ─ прилади, які призначені для вимірювань атмосферного тиску;

- манометри надлишкового тиску ─ прилади, які призначені для вимірювань тиску вище атмосферного, а фактично - різниці між абсолютним і атмосферним тисками;
- вакуумметри ─ прилади, призначені для вимірювань тиску нижче атмосферного;
- диференціальні манометри ─ прилади, які призначені для вимірювань різниці двох тисків, жодне з яких не є атмосферним тиском.

За принципом дії манометри поділяють на:

- рідинні манометри ─ прилади, в яких вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа рідини відповідної висоти;
- механічні деформаційні манометри ─ прилади, в яких вимірюваний тиск визначається за розміром деформації різних пружних чутливих елементів або за силою, яку вони розвивають, і мають механічні відлікові пристрої;
- електромеханічні манометри ─ прилади, в яких вимірюваний тиск попередньо перетворюється в деформацію пружного чутливого елемента, або переміщення його незакріпленої частини з подальшим перетворенням цих величин в електричні величини з використанням тензорезистивних, ємнісних, індуктивних, взаємоіндуктивних, п'єзоелектричних та інших вторинних перетворювачів;
- електрофізичні манометри ─ принцип дії яких заснований на залежності електричних параметрів (опір, ємність, електропровідність та ін.) манометричного перетворювача від вимірюваного тиску.

У манометрах з гідродинамічним врівноваженням мірою вимірюваного тиску є висота стовпа робочої, так званої манометричної, рідини. Нею може бути дистильована вода, ртуть, етиловий спирт, трансформаторне масло і ін.вибір роду рідини визначається діапазоном вимірювань, умовами експлуатації,необхідною точністю вимірювань.

Широке застосування в промисловості придбали механічні деформаційні манометри. Вони прості конструктивно, надійні і мають відносно високу точність.

Для передачі переміщення пружного чутливого елемента до стрілки манометра в таких приладах використовуються зубчасті передавальні механізми.

На рис. 1.4. Показані конструкції манометра з секторним передавальним механізмом. Первинним перетворювачем тут є одновіткова трубчаста пружина (трубка Бурдона) 1. Переміщення вільного кінця пружини, викликане вимірюваним тиском, через тягу 3 передається передавальному механізму 2, з'єднаному з покажчиком (стрілкою) відлікового пристрою[3,6,7].

Граничні номінальні значення вимірюваного тиску таких манометрів знаходиться в межах від 0,1 до 160 МПа. Найвищий клас точності─0,5.

Для роботи в системах автоматичного контролю абсолютного, надлишкового або гідростатичного тиску, а також різниці тисків двох досліджуваних середовищ і їх перетворення в уніфікований вихідний сигнал, промисловістю випускається понад 20 моделей вимірювальних перетворювачів типу «Сапфір». Діапазон перетворюваних тисків цих перетворювачів знаходиться в межах від 0,25 кПа до 100 МПа з допустимими основними похибками 0,25; 0,5 або 1% і нормованим вихідним струмом 0─5 мА, 0─20 мА і 4─20 мА.

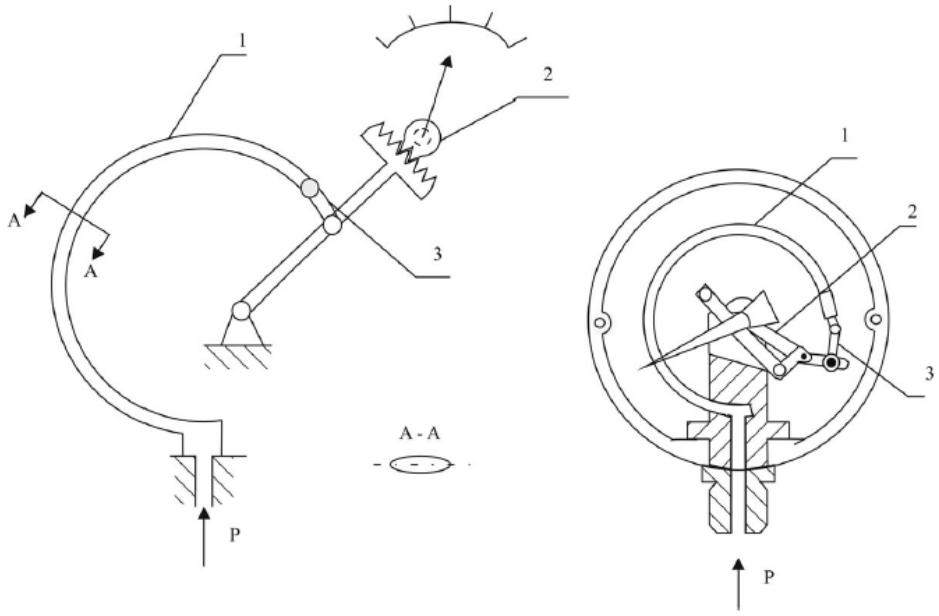

Рис. 1.4. Конструкція манометрів з одновіткової трубчастої пружиною [1]

На рис. 1.5 показана конструкція тензорезистивного датчика різниці тисків типу «Сапфір». Датчик має первинний мембранно-важільний перетворювач різниці тисків 1, розділові мембрани 2 і 3, з'єднані між собою і з кінцем важеля первинного перетворювача за допомогою тяги 4. Дія вимірюваної різниці тисків $P_1 > P_2$ призводить до переміщення тяги і, відповідно, кінця важеля, деформації мембрани, з монокристалічного сапфіра, на зовнішню поверхню якої нанесена тензочутлива гетероепітаксіальна плівка кремнію. Тензорезистори через герметичний вивід приєднуються до вторинного перетворювача, який входить до складу «Сапфіра» і служить для перетворення зміни опору тензорезисторів у вихідний уніфікований сигнал[6].

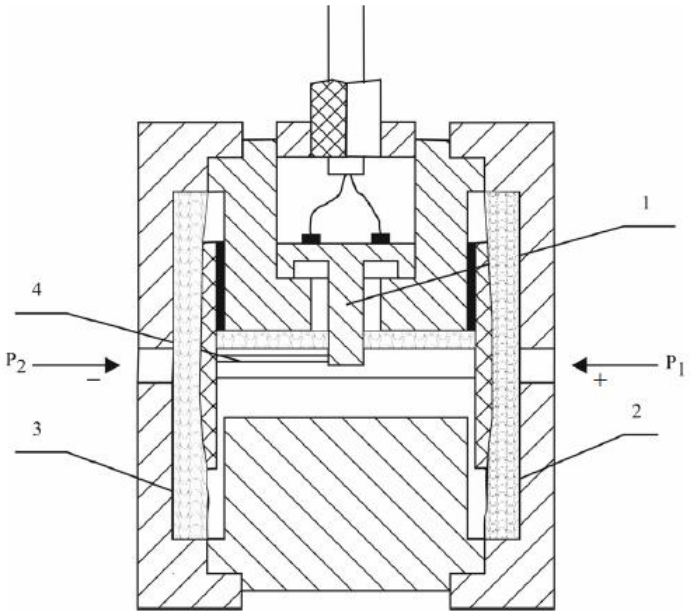

Рис. 1.5. Датчик різниці тиску типу «Сапфір» [1]

У ємнісних перетворювачах тиску чутливими елементами, які перетворюють вимірюваний тиск в переміщення, є мембрани. Одночасно вони можуть бути використані в якості рухомих електродів. Ємнісні перетворювачі зазвичай мають верхню межу (200─800) Па при чутливості (0,5─1,0) пФ/Па і початкової ємності (10─20) ПФ. Основна їх похибка становить (1─2)%.

Для вимірювань тиску з попереднім його перетворенням в переміщення широко застосовуються вторинні прилади з диференційно-трансформаторними вимірювальними ланцюгами.

1.4. Перетворювачі кругових моментів (торсіометри)

Прилади для вимірювань кругових моментів називаються торсіометрами. Для вимірювання кругових моментів найчастіше використовують методи, засновані на перетворенні кругового моменту в деформацію (механічні напруги) пружного елемента, виконаного у вигляді суцільного вала (торсіона), спіральних пружин, підвісів або розтяжок. Деформація (механічна напруга) пружного елемента перетворюється в

електричний сигнал за допомогою тензорезистивних, індуктивних, магнітопружних та інших перетворювачів.

Тангенціальна напруга τ на поверхні суцільного вала, який знаходиться під дією кругового моменту $M_{кр}$, пов'язана з залежністю

$$\tau = M_{кр}/W_p \tag{1.14}$$

де $W_p = \frac{\pi R^3}{2}$ - полярний момент опору круглого валу радіусом R.

Для вимірювань тангенціальних напруг можна використовувати тензорезистори, наклеєні безпосередньо на валах досліджуваних об'єктів, а якщо це неможливо, — на пружних елементах, з'єднаних з робочим валом (рис.1.6). Тензорезистори наклеюють в напрямку найбільших тангенціальних напруг, тобто під кутом 45° до осі вала. У цьому випадку чутливий елемент тензорезистора буде відчувати деформації

$$\varepsilon = \frac{\tau}{2G} \tag{1.15}$$

де G-модуль зсуву матеріалу досліджуваного вала.

Розміщенням тензорезисторів під кутом 45° до осі вала і під кутом 90° один до одного, а також попарно на діаметрально протилежних сторонах вала, як показано на рис. 1.6., з подальшим з'єднанням їх в схему одинарного моста забезпечується не тільки температурна компенсація, а й усувається вплив деформації вигину вала на результат вимірювань[7].

Якщо використовують чотири тензорезистори, які попарно сприймають деформацію різних знаків, вихідна напруга мостового ланцюга [3, 7]:

$$U_{вих} = U_{вх}k\varepsilon = U_{вх}k\frac{\tau}{2G}U_{вх}k\frac{8M_{кр}}{\pi D^2 G} \tag{1.16}$$

Звідки

$$M_{KP} = \frac{\pi D^3 G U_{вих}}{8kU_{вх}} \tag{1.17}$$

де k-коефіцієнт відносної тензочутливості тензорезистора.

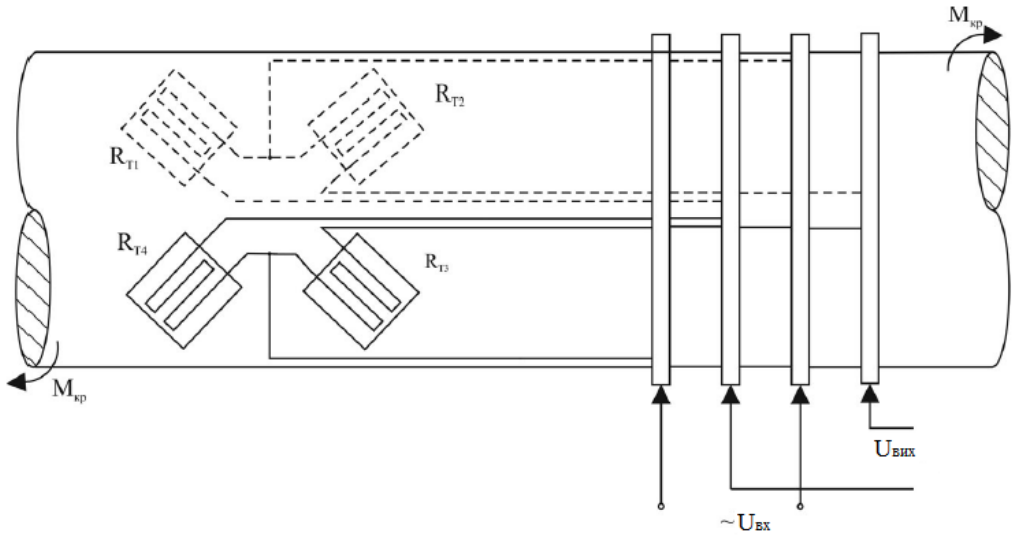

Рис. 1.6. Схема вимірювань крутильних моментів обертових валів[1]

Одним з важливих елементів торсіометра для вимірювання крутних моментів обертових валів є струмознімач, який з'єднує тензорезистори з електричної вимірювальної ланцюгом. Його виготовляють у вигляді контактного кільця, насадженого на вал, і контактних щіток (рис. 1.6). Значний вплив на результат вимірювань в таких випадках можуть мати флуктуації перехідних опорів контактів і контактні термоЕРС, які виникають в результаті нагрівання контактів через тертя в них. Для зменшення цього впливу кільця і щітки виготовляють з матеріалів, які в парі мають малий перехідний опір і малу термоЕРС, а також застосовують інші схемні рішення. Наприклад, якщо чотири тензорезистора з'єднати в замкнуте кільце, А струмознімаючі кільця під'єднати до вершини моста, тоді опору контактів будуть додаватися лише до опорів Джерела живлення і індикатора, а їх вплив на результат вимірювань буде незначним. Для усунення впливу паразитних контактних термоЕРС вимірювальну ланцюг живлять від джерела змінної напруги[7].

Схема безконтактного торсіометра для вимірювань крутного моменту обертових валів показана на рис. 1.7. На валу 1 Чотири тензорезистори R_T, розміщені попарно з двох сторін валу, утворюють тензорезистивний міст.

Живлення мостового ланцюга і підключеного до його виходу перетворювача напруга — частота (ПНЧ) 2 здійснюється від блоку живлення 3 через трансформатор 4 з рухомою вторинною обмоткою, яка знаходиться на рухомому валу. Первинна обмотка w_1 трансформатора підключена до джерела 5 синусоїдної напруги з частотою 5-10 кГц. Протягом напівперіоду вихідної напруги ПНЧ, коли ключ S розімкнений, напруга, яке наводиться у вторинній обмотці трансформатора, випрямляється, стабілізується і подається на тензометричний міст. Напруга розбалансу моста надходить на вхід ПНЧ, який служить для перетворення напруги розбалансу в пропорційну йому частоту f_x.

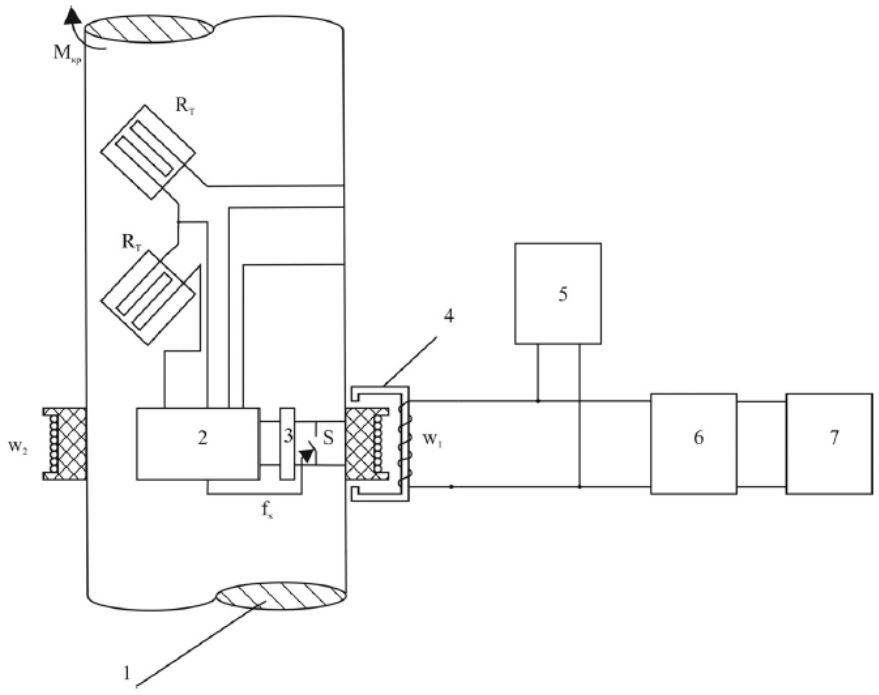

Рис. 1.7. Схема безконтактного торсіометра [1]

Сигнал з виходу ПНЧ у вигляді частотно модульованого змінної напруги управляє ключем S, який з частотою f_x замикає і розмикає вторинну обмотку w_2 трансформатора, викликаючи модуляцію напруги на обмотці w_1. Ця напруга після амплітудного демодулятора 6 подається на аналоговий або цифровий частотомір 7. Для несучої частоти 5 кГц чутливість приладу до відносної зміни опору тензорезисторів становить $\Delta f_x/\varepsilon$ = 5000 Гц % [7].

Похибка вимірювання крутних моментів за допомогою наклеєних тензорезисторів може бути доведена до 1-1,5% при попередньому градуруванні вимірювального приладу з наклеєними тензорезисторами. Без такого градуювання похибка може досягати 5-10 %.

При вимірюванні великих кругових моментів (наприклад, на валах бурових елементів) застосовують магнітопружні трансформаторні перетворювачі, в яких в якості магнітопружного елемента, магнітна проникність якого змінюється зі зміною механічних напруг (кругового моменту), використовується сам сталевий вал. Перевагою такого методу є те, що намагнічуюча і вимірювальна (вторинна) обмотка перетворювача розміщені на нерухомому статорі, чим забезпечується висока надійність пристрою. Похибка вимірювання кругових моментів за допомогою серійних приладів такого типу не перевищує 1,5 % [7].

Для вимірювання механічних напруг найчастіше використовуються металеві або напівпровідникові тензорезистори за схемами, аналогічним вимірюванню зусиль. Для схеми, зображеної на рис. 1.8, при однорідному об'ємнонапруженому стані ізотропного матеріалу в межах пружних деформацій, можна за виміряними значеннями головних деформацій ε_x., ε_y, ε_z визначити головні напруги σ_x, σ_y і σ_z, використавши рівняння зв'язку:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)\right] \qquad (1.18)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right]$$

де Е-модуль пружності; μ — коефіцієнт Пуассона.

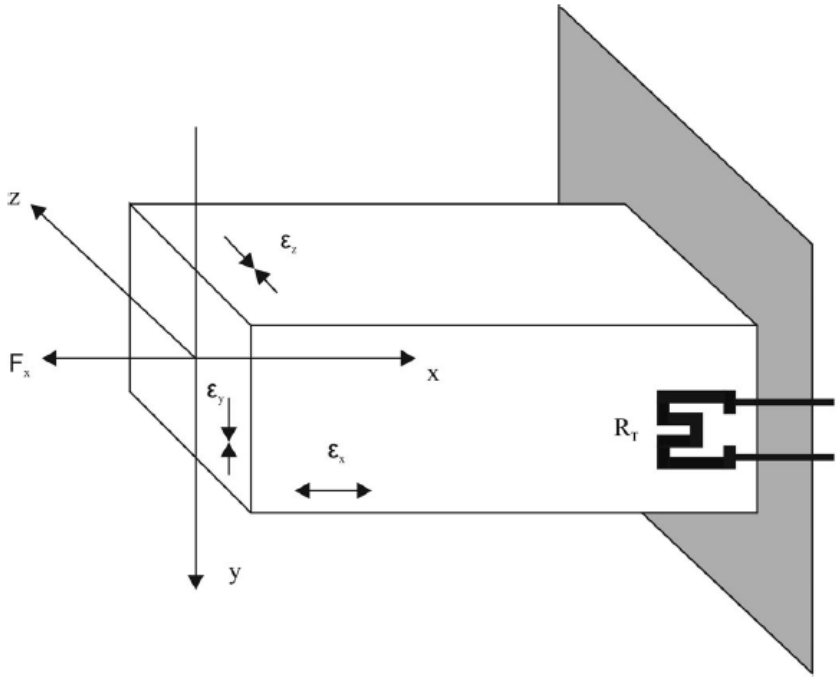

Рис. 1.8. До визначення механічних напруг [1]

Для плосконапруженого стану, коли, наприклад, $\sigma_z = 0$, рівняння (1.18) приймають вигляд:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \qquad (1.19)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{E}\mu(\sigma_x + \sigma_y)$$

Звідси

$$\sigma_x = E(\varepsilon_x - \mu\varepsilon_y)(1 - \mu^2) \qquad (1.20)$$

$$\sigma_y = E(\varepsilon_y - \mu\varepsilon_x)(1 - \mu^2)$$

а при лінійному напруженому стані матиме вигляд:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \qquad (1.21)$$

1.6. Реостатні датчики переміщень

Реостатними називаються датчики, виконані у вигляді реостата, двигуном якого переміщається під дією вхідної перетворюваної величини. Вихідною величиною є електричний опір, функціонально пов'язане з положенням повзунка. Слід зазначити, що реостатні датчики застосовуються не тільки для перетворень переміщень. Так як в переміщення можуть бути перетворені за допомогою механічних пружних елементів багато неелектричні величини, то реостатні перетворювачі використовуються в датчиках тиску, сили, витрати, рівня і т.д. [8].

Залежно від матеріалу чутливого елемента реостатні перетворювачі діляться на дротяні, недротові, фотоелектричні, рідинні і з провідної кераміки.

Дротяні реостатні датчики відрізняються найвищою точністю і стабільністю функції перетворення, мають малий перехідний опір, низький рівень шумів, малий ТКС. Їх недоліком є низька роздільна здатність, порівняно невисокий опір (до десятків кілоом), обмежена можливість застосування на змінному струмі, обумовлена залишковими індуктивністю і ємністю намотування. Указані недоліки відсутні в недротових датчиках, проте вони значно поступаються дротяним по точності.

Найбільш поширеними є дротяні реостатні перетворювачі, які в залежності від конструктивного виконання діляться на перетворювачі з поступальним і перетворювачі з обертальним переміщенням рухомого елемента. Перші (рис. 1.9, а) виготовляються зазвичай на стрижневих, трубчастих або пластинчастих каркасах 1, на які намотана із заданим кроком або виток до витка ізольована резистивний дріт, що утворює чутливий елемент 2. Рухомим елементом є контактна щітка, що складається з контакту 3 і контактотримача 4[8].

Перетворювачі з обертальним переміщенням рухомої частини можуть бути однооборотними або багатооборотними. Однооборотні (рис.1.9, б)

мають чутливий елемент у вигляді обмотки 1, нанесеної на Кільцевій каркас 2. Рухомий елемент такого перетворювача складається з контактної струмознімальної щітки 3, укріпленої на Щіткотримачі 4. Струмознімання здійснюється за допомогою контактної пружини 5, ковзної по нерухомому струмознімальному кільцю 6.

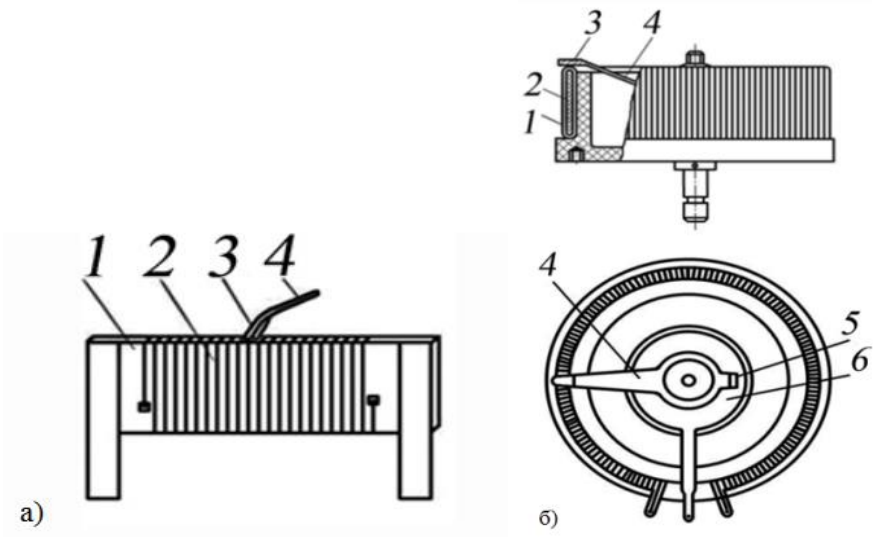

Рис. 1.9. Реостатні перетворювачі:а ─ поступальним переміщенням б─ обертальним переміщенням

До матеріалу дроту реостатних перетворювачів пред'являється ряд вимог, зокрема, він повинен володіти високим питомим електричним опором, малим ТКО, володіти стабільністю характеристик у часі, високою корозійною стійкістю, великою міцністю на розрив. У реостатних перетворювачах широко використовують обмотки з манганіна, константана, а у випадках, коли перетворювач повинен працювати в умовах підвищених температур, обмотки виготовляють з залізо-хромових або нікелево-хромових сплавів[8].

В особливо відповідальних випадках і при специфічних умовах роботи застосовують сплави на базі благородних металів. Так, в разі, коли до реостатному перетворювача пред'являються вимоги високої зносостійкості, застосовується, зокрема, платино-іридієвий сплав (90% платини і 10% іридію). Добавка іридію до платини збільшує її твердість, зносостійкість,

хімічну стійкість. Питомий опір цього сплаву ρ = 0,23 Ом*м, а діаметр проводу може бути досить малим (від 0,01 мм), що дозволяє виготовляти високоомні перетворювачі дуже малих габаритів.

Для забезпечення високої стабільності характеристик реостатних перетворювачів пред'являються певні вимоги і до каркасів. Вони повинні зберігати свої розміри в широкому температурному діапазоні, в умовах підвищеної вологості. Крім того, каркаси повинні володіти високою теплопровідністю, що дозволить збільшити питому розсіюється в перетворювачі потужність. Тому каркаси прецизійних реостатних перетворювачів виготовляють з алюмінієвих сплавів АМг, Д1, Д16. У перетворювачах, що допускають похибку перетворення 1% і більше, вони можуть виготовлятися з ізоляційних матеріалів, наприклад, гетинакса, текстоліту, склопластику та ін.[8].

Конструкція контактних щіток в значній мірі визначає якість перетворювача і, в першу чергу, рівень так званого контактного шуму, що генерується щіткою при її русі по доріжці перетворювача. Контактний шум, що виникає в області контакту, викликається варіаціями контактного опору, які, в свою чергу, пов'язані з варіаціями контактної площі і контактного тиску, особливо при наявності на доріжці сторонніх частинок. Контактний шум має тенденцію до зростання в часі внаслідок зносу, забруднення і окислення доріжки і щітки.

Контактні щітки прецизійних реостатних перетворювачів виконуються у вигляді двох-трьох зволікань діаметром 0,1─0,2 мм (кілька відрізняються одна від одної по довжині), які укріплені на щіткотримачі. Різна довжина контактних дротин забезпечує їх різні власні частоти механічних коливань, що сприяє стійкій роботі перетворювача в умовах вібрацій. У менш точних перетворювачів щітки робляться пластинчастими, що складаються з однієї профільованої пластини з одним або двома надрізами, що забезпечують різні власні частоти вібрацій окремих її виступів. Дротяні щітки розраховані на контактні зусилля 0,003─0,005 Н, пластинчасті 0,05─0,1 Н. Ширина

контактної поверхні щітки повинна бути рівною двом-трьом діаметрам дроту чутливого елемента[7,8].

Виготовляють щітки або з чистих металів (платини, срібла), або зі сплавів (платини з іридієм або берилієм, фосфористої бронзи, мідно срібних сплавів і т.д). При виборі матеріалу щіток не слід забувати і про термоелектричному ефекті, особливо для перетворювачів, призначених для роботи на постійному струмі.

Вид функції перетворення $R_{вих} = f(x)$ реостатного перетворювача визначається характером зміни кроку намотування по довжині каркаса, або профілем каркаса при рівномірному кроці намотування (для спрощення конструкції вдаються зазвичай до ступінчастою формі каркаса), або шунтуванням ділянок обмотки відповідними опорами. Останній так званий спосіб електричного профілювання завдяки ряду переваг (можливість отримання різних функцій перетворення на базі найбільш простого і технологічного лінійного реостата, можливість корекції похибок вихідного лінійного перетворювача і т.п.) набув найбільшого поширення [9].

Визначивши за графіком відношення m_i еквівалентних опорів у вузлах апроксимації до відповідних значень опорів лінійного перетворювача, визначають самі значення еквівалентних опорів.

Конструктивний розрахунок реостатного перетворювача зводиться зазвичай до визначення діаметра і довжини намотувального проводу, а також геометричних розмірів каркаса. Вихідними даними, як правило, є повний опір $R_п$, довжина намотування l , Матеріал намотувального проводу і його питомий електричний опір ρ, максимальна потужність, вимірювальний струм, допустиме значення похибки[8].

Джерелами похибок реостатних перетворювачів є дискретність вихідного опору, відхилення функції перетворення від розрахункової, викликане мінливістю діаметра намотувального проводу і його питомого електричного опору, зміна температури перетворювача, термодинамічні і струмові шуми, вплив опору навантаження.

Похибка дискретності для перетворювачів з рівномірним намотуванням (лінійних перетворювачів):

$$\delta_{\text{диск р}} = \frac{\Delta R_{min}}{2R_{\text{п}}} = \frac{1}{2\omega} \qquad (1.22)$$

де R_{min}— опір одного витка перетворювача; $R_{\text{п}}$, — повний опір і число витків обмотки перетворювача.

Для реальних конструкцій лінійних реостатних перетворювачів число витків становить близько 2000, а похибка дискретності відповідно дорівнює 0,02─0,03%. Сумарна похибка, викликана мінливістю електричних параметрів перетворювача, досягає 0,03─0,1%. Температурна похибка, яка визначається перш за все температурним коефіцієнтом опору намотувального проводу, не перевищує зазвичай 0,1% на 10° С.

Реостатні перетворювачі застосовують в датчиках лінійних і кутових переміщень і прискорень, а також статичних тисків[8].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Multisim електронне програмне забезпечення

Якщо вам потрібно програмне забезпечення, за допомогою якого можна розробляти і втілювати в життя електронні принципові схеми, то програма під назвою Multisim підійде для цього якнайкраще.

Multisim - це програмне забезпечення промислового стандарту, що підтримує SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis де SPICE з англійської-Імітаційна Програма з Вбудованим Виразом Ланцюга). Воно застосовується для моделювання та програмування схем для аналогової, цифрової та силової електроніки в освітній та дослідницькій областях. Multisim є унікальною можливістю розробки схем і її тестування, емуляції з одного середовища розробки. У такого підходу є безліч переваг. Новачкам в Multisim не потрібно турбуватися про складний синтаксис SPICE і його командах, а у просунутих користувачів є можливість налаштування всіх параметрів SPICE[10].

Electronics Workbench є родоначальником пакета NI Multisim.У той час він в основному використовувався як навчальний посібник для навчання електронщиків і програм електронної інженерії в коледжах і університетах. National Instruments зберегла цю традицію, випустивши спеціальну версію NI Multisim з функціями, розробленими для навчання в електроніці.

Підрозділ Electronics Workbench Group компанії National Instruments анонсувало випуск Multisim 10.0 і Ultiboard 10.0, найостанніших версій програмного забезпечення для інтерактивного SPICE-моделювання та аналізу електричних ланцюгів , використовуваних в схемотехніці, проектуванні друкованих плат і комплексному тестуванні. Ця платформа пов'язує процеси тестування і проектування, надаючи розробнику електронного обладнання гнучкі можливості технології віртуальних приладів.

Завдяки Multisim опис схеми став як ніколи простим і інтуїтивно зрозумілим. Представлення у вигляді електронної таблиці дозволяє

одночасно змінювати характеристики будь-якої кількості елементів: від схеми друкованої плати до моделі SPICE. Безрежимне редагування - це найбільш ефективний спосіб розміщення і з'єднання компонентів. Працювати з аналоговими і цифровими складовими елементами інтуїтивно просто і зрозуміло[11].

Крім традиційного аналізу SPICE, Multisim дозволяє користувачам підключати до схеми віртуальні прилади. Концепція віртуальних інструментів-це простий і швидкий спосіб побачити результат за допомогою імітації реальних подій. Також в Multisim є спеціальні компоненти під назвою «інтерактивні елементи» (interactive parts), ви можете змінювати їх під час емуляції. До інтерактивних елементів відносяться перемикачі, Потенціометри, найменші зміни елемента відразу відображаються в імітації.

У Multisim є бази даних трьох рівнів:

- з головної бази даних (Master Database) можна тільки зчитувати інформацію, в ній знаходяться всі компоненти;
- користувацька база даних (User Database) відповідає поточному користувачеві комп'ютера. Вона призначена для зберігання компонентів, які небажано надавати в загальний доступ;
- корпоративна база даних (Corporate Database). Призначена для тих компонентів, які повинні бути доступні іншим користувачам в сітці.

Засоби управління базами даних дозволяють переміщати компоненти, об'єднувати дві бази в одну і редагувати їх. Всі бази даних поділяються на групи, А вони, в свою чергу, на сімейства. Коли користувач вибирає компонент і поміщає його в схему, створюється нова копія, всі зміни з нею ніяк не зачіпають інформацію, що зберігається в базі даних[11].

База даних Master Database розділена на групи:

- Sources. Містить всі джерела напруги і струму, заземлення. Наприклад, power sources (джерела постійної, змінної напруги, заземлення, бездротові з'єднання-VCC, VDD, VSS, VEE), signal voltage sources (джерела прямокутних імпульсів, джерело сигналу через певні проміжки часу), signal current sourses (постійні, змінні джерела струму, джерела прямокутних імпульсів)
- Basic. Містить основні елементи схемотехніки: резистори, індуктивні елементи, ємнісні елементи, Ключі, Трансформатори, реле, коннектори і інші елементи.
- Diodes. Містить різні види діодів: фотодіоди, Діоди Шотткі, світлодіоди і інші елементи.

Transistors. Містить різні види транзисторів: pnp -, npn-транзистори, біполярні транзисори, МОН-транзистори, КМОН-транзистори і інші елементи.

- Analog. Містить всі види підсилювачів: операційні, диференціальні, інвертуючі і т. д.
- TTL. Містить елементи транзисторно-транзисторної логіки
- CMOS. Містить елементи КМОН-логіки.
- MCU Module-керуючий модуль багатопунктового зв'язку (від англ. multipoint control unit)
- Advanced_Peripherals. Містить підключаються зовнішні пристрої (дисплеї, термінали, клавішні поля).
- Misc Digital. Містить різні цифрові пристрої.
- Mixed. Містить Комбіновані компоненти
- Indicators. Містить вимірювальні прилади вольтметри, амперметри, лампи і інше.

2.2. Переваги і недоліки Multisim в порівнянні з іншими програмами

Переваги Multisim:

- величезна кількість різних функцій, що дозволяють проектувати електричну схему будь-якого ступеня складності.
- Додаток можна налаштувати будь-яким зручним для конкретного користувача чином.
- програма постійно оновлюється, приносячи своїм власникам все нові і нові функції.

Мінуси:

- відсутність російської мови може стати вирішальним фактором.

Micro-Cap —SPICE-подібна програма для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем з інтегрованим візуальним редактором. Розробляється компанією Spectrum Software. Адаптована до Microsoft Windows-32/64[12].

Переваги:

- можливість записати проміжний результат

Недоліки:

- несумісні з реальним життям схеми.
- Transient Analysis може зупинитись в невизначений момент часу (на деяких імпульсних схемах)
- повільно моделює
- " не зовсім " правдиві моделі деяких компонентів, а деяких немає взагалі
- явно відсталий метод симуляції, точність залежить від розміру кроку, автовибору кроку не має.

OrCAD — пакет комп'ютерних програм, призначений для автоматизації проєктування електроніки. Використовується в основному для створення електронних версій друкованих плат для їх виробництва, а також для виробництва електронних схем і їх моделювання[13].

Переваги:

- Capture-графічний редактор для створення електричних принципових схем з моделей елементів;
- Capture Component Information System Option-графічний редактор, аналогічний попередньому і має доступ до постійно оновлюваних каталогів компонентів, що містить більше 200 000 найменувань;
- PSpice Analog Digital-програма для моделювання роботи аналогових або змішаних аналого-цифрових пристроїв великого розміру (або їх частин);
- PSpice advanced Analysis-модуль параметричної оптимізації;
- PCB Designer-редактор топологій плат.

Недоліки:

- його висока вартість. Ціни для вітчизняних розробників коливаються від 30000 грн[13].

Проаналізувавши можливі віртуальні програми такі як Micro-Cap, OrCAD, Multisim для моделювання вимірювальних систем, та відштовхуючись від поставлених задач, нами було обрано програму Multisim. Тому що, проста в використанні, величезна кількість різних функцій, що дозволяють проектувати електричну схему будь-якої складності і різних задач.

РОЗДІЛ 3. Експериментальне моделювання в віртуальній програмі Multisim

3.1. Дослідження тензорезистивних вимірювальних систем

Для дослідження тензорезистивних датчиків за допомогою програми Multisim зберемо електричну схему яка зображена на рисунку 3.1. Задаємо значення елементів. Живлення схеми V=10В а опір на резисторах R=1*10^3Ом. Таким чином знімаємо залежність напруги на виході схеми від опору датчика. Одночасно змінюємо R_3 і R_4 з кроком 5% від 0 до 100. Потім проведемо дослідження для інших значень опору резисторів: 0,8*10^3Ом, 0,4*10^3Ом, 0,2*10^3Ом

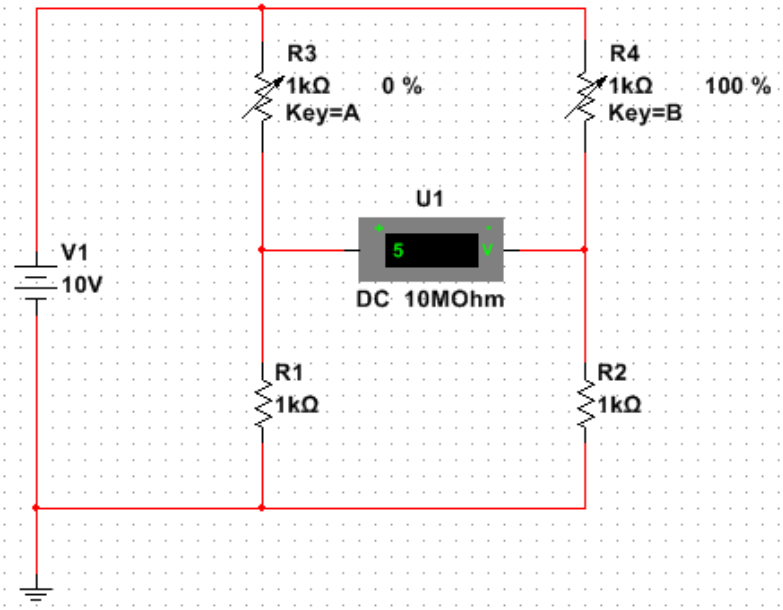

Рис. 3.1. Електрична схема тензорезистивних датчиків з опором R=1*10^3Ом та джерелом живлення з ЕРС 10В

Отримані результати дослідження вимірювального мосту тензорезистивних датчиків відображені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати замірів з живленням схеми 10В і опорами на резисторах: $1*10^3$Ом,$0,8*10^3$Ом, $0,4*10^3$Ом, $0,2*10^3$Ом.

R=$1*10^3$Ом, V=10В			R=$0,8*10^3$Ом, V=10В			R=$0,4*10^3$Ом, V=10В			R=$0,2*10^3$Ом, V=10В		
R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В
0	100	5	0	100	5	0	100	5	0	100	5
5	95	4,39	5	95	4,39	5	95	4,39	5	95	4,39
10	90	3,82	10	90	3,82	10	90	3,82	10	90	3,82
15	85	3,29	15	85	3,29	15	85	3,29	15	85	3,29
20	80	2,77	20	80	2,77	20	80	2,77	20	80	2,77
25	75	2,28	25	75	2,28	25	75	2,28	25	75	2,28
30	70	1,81	30	70	1,81	30	70	1,81	30	70	1,81
35	65	1,34	35	65	1,34	35	65	1,34	35	65	1,34
40	60	0,89	40	60	0,89	40	60	0,89	40	60	0,89
45	55	0,44	45	55	0,44	45	55	0,44	45	55	0,44
50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
55	45	-0,44	55	45	-0,44	55	45	-0,44	55	45	-0,44
60	40	-0,89	60	40	-0,89	60	40	-0,89	60	40	-0,89
65	35	-1,34	65	35	-1,34	65	35	-1,34	65	35	-1,34
70	30	-1,81	70	30	-1,81	70	30	-1,81	70	30	-1,81
75	25	-2,28	75	25	-2,28	75	25	-2,28	75	25	-2,28
80	20	-2,77	80	20	-2,77	80	20	-2,77	80	20	-2,77
85	15	-3,29	85	15	-3,29	85	15	-3,29	85	15	-3,29
90	10	-3,82	90	10	-3,82	90	10	-3,82	90	10	-3,82
95	5	-4,39	95	5	-4,39	95	5	-4,39	95	5	-4,39
100	0	-5	100	0	-5	100	0	-5	100	0	-5

Як ми бачимо значення напруги залишається не змінним при зміні опорів резисторів.

Тепер дослідимо тензорезистивний датчик за допомогою програми Multisim зберемо електричну схему яка зображена на рисунку 3.2. Живлення схеми V=3В а опір на резисторах R=$1*10^3$Ом. Аналогічно зробимо дослідження як із живленням схеми 10В, змінюючи опори резисторів і R_3 і R_4 з кроком 5%

Отримані результати для дослідження тензорезистивних датчиків відображені в таблиці 3.2.

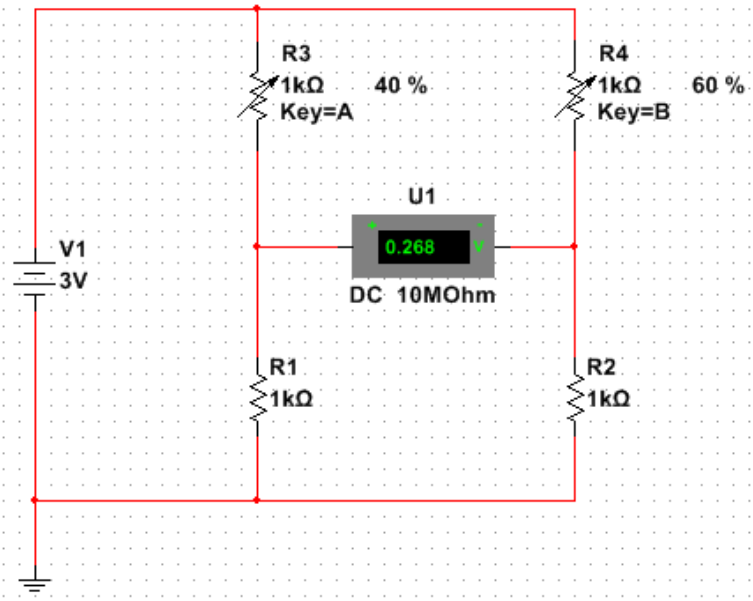

Рис. 3.2. Електрична схема тензорезистивних датчиків з опором R=1*10^{3}Ом та джерелом живлення з ЕРС 3В

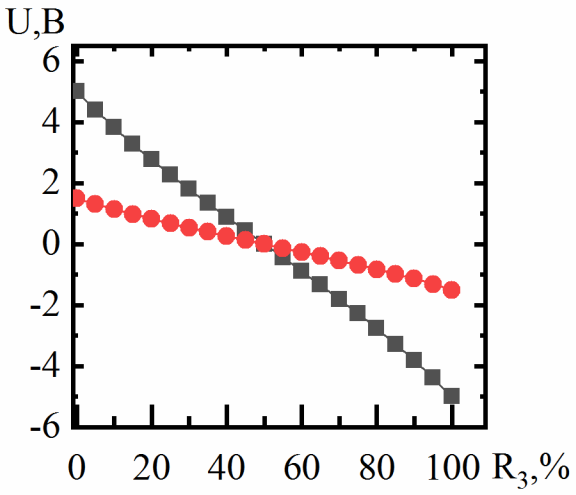

Рис. 3.3. Залежність напруги U від зміни опору R тензорезистора (напруга живлення: ■ − 10В,○ −3В)

Проводячи модуляцію з живленням схеми V=3В а опорами на резисторах R=0,8*10^{3}Ом, 0,4*10^{3}Ом, 0,2*10^{3}Ом. Результати модуляції ідентичні з опром R=1*10^{3}Ом.

Таблиця 3.2. Результати замірів з живленням схеми V=3В і опорами на резисторах: $1*10^3$Ом,$0{,}8*10^3$Ом, $0{,}4*10^3$Ом, $0{,}2*10^3$Ом.

R=$1*10^3$Ом, V=3В			R=$0{,}8*10^3$Ом, V=3В			R=$0{,}4*10^3$Ом, V=3В			R=$0{,}2*10^3$Ом, V=3В		
R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В	R_3, %	R_4, %	U,В
0	100	1,5	0	100	1,5	0	100	1,5	0	100	1,5
5	95	1,31	5	95	1,31	5	95	1,31	5	95	1,31
10	90	1,14	10	90	1,14	10	90	1,14	10	90	1,14
15	85	0,98	15	85	0,98	15	85	0,98	15	85	0,98
20	80	0,83	20	80	0,83	20	80	0,83	20	80	0,83
25	75	0,68	25	75	0,68	25	75	0,68	25	75	0,68
30	70	0,54	30	70	0,54	30	70	0,54	30	70	0,54
35	65	0,4	35	65	0,4	35	65	0,4	35	65	0,4
40	60	0,26	40	60	0,26	40	60	0,26	40	60	0,26
45	55	0,13	45	55	0,13	45	55	0,13	45	55	0,13
50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
55	45	-0,13	55	45	-0,13	55	45	-0,13	55	45	-0,13
60	40	-0,26	60	40	-0,26	60	40	-0,26	60	40	-0,26
65	35	-0,4	65	35	-0,4	65	35	-0,4	65	35	-0,4
70	30	-0,54	70	30	-0,54	70	30	-0,54	70	30	-0,54
75	25	-0,68	75	25	-0,68	75	25	-0,68	75	25	-0,68
80	20	-0,83	80	20	-0,83	80	20	-0,83	80	20	-0,83
85	15	-0,98	85	15	-0,98	85	15	-0,98	85	15	-0,98
90	10	-1,14	90	10	-1,14	90	10	-1,14	90	10	-1,14
95	5	-1,31	95	5	-1,31	95	5	-1,31	95	5	-1,31
100	0	-1,5	100	0	-1,5	100	0	-1,5	100	0	-1,5

За отриманими результатами модуляції збудуємо графік залежності напруги від зміни опору на тензорезистивних датчиках. Графік залежності зображено на рисунку 3.3.

З графіка залежності бачимо що кращу чутливість тензорезисторний вимірювальний міст показує при більшій напрузі живлення. Але при підвищенні напруги в реальних (не модульованих) ситемах потрібно враховувати той факт що її необхідно розсіяти у вигляді теплового випромінювання, що веде за собою необхідність гарного теплового контакту датчика з підкладкою (досліджуваним об’єктом).

Для дослідження тензорезистивних датчиків для не збалансованого мосту за допомогою програми Multisim зберемо електричну схему яка зображена на рисунку 3.4. Задаємо значення елементів. Живлення схеми V=10В а опір на резисторах R_1 і R_2=0,25*10^3Ом; R_1 і R_2 =0,5*10^3Ом R_3 і R_4=1*10^3Ом;. Таким чином знімаємо залежність напруги на виході схеми від опору датчика. Одночасно змінюємо R_3 і R_4 з кроком 5% від 0 до 100.

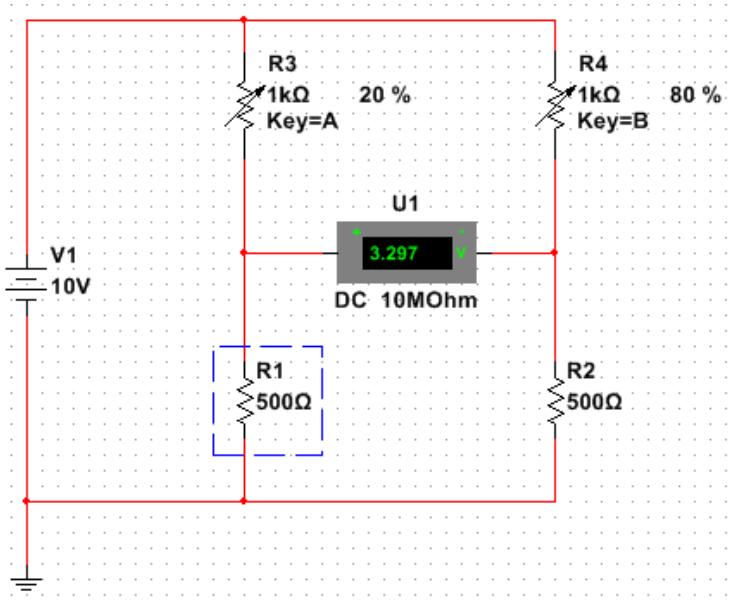

Рис. 3.4. Електрична схема тензорезистивних датчиків з опором R_1 і R_2 =0,5*10^3Ом; R_3 і R_4=1*10^3Ом та джерелом живлення з ЕРС 10В

Додатково проведено моделювання роботи тензорезистивного вимірювально моста у незбалансованому режимі. Отримані результати дослідження вимірювального мосту тензорезистивних датчиків відображені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Результати замірів з живленням схеми 10В і опорами на резисторах: R_1 і R_2 =0,5*10^3Ом; R_1 і R_2=0,25*10^3Ом R_3 і R_4=1*10^3Ом.

R_1 і R_2=0,25*10^3Ом; R_3 і R_4=1*10^3Ом;V=10В			R_1 і R_2=0,5*10^3Ом; R_3 і R_4=1*10^3Ом; V=10В		
R_3,%	R_4,%	U_1,В	R_3,%	R_4,%	U_2,В
0	100	7,99	0	100	6,66

5	95	6,25	5	95	5,64
10	90	4,96	10	90	4,76
15	85	3,97	15	85	3,98
20	80	3,17	20	80	3,29
25	75	2,5	25	75	2,66
30	70	1,91	30	70	2,08
35	65	1,38	35	65	1,53
40	60	0,9	40	60	1,01
45	55	0,44	45	55	0,50
50	50	0	50	50	0
55	45	-0,44	55	45	-0,50
60	40	-0,9	60	40	-1,01
65	35	-1,38	65	35	-1,53
70	30	-1,91	70	30	-2,08
75	25	-2,5	75	25	-2,66
80	20	-3,17	80	20	-3,29
85	15	-3,97	85	15	-3,98
90	10	-4,96	90	10	-4,76
95	5	-6,25	95	5	-5,64
100	0	-7,99	100	0	-6,66

За отриманими результатами модуляції збудуємо графік залежності напруги від зміни опору на тензорезистивних датчиках. Графік залежності зображено на рисунку 3.5.

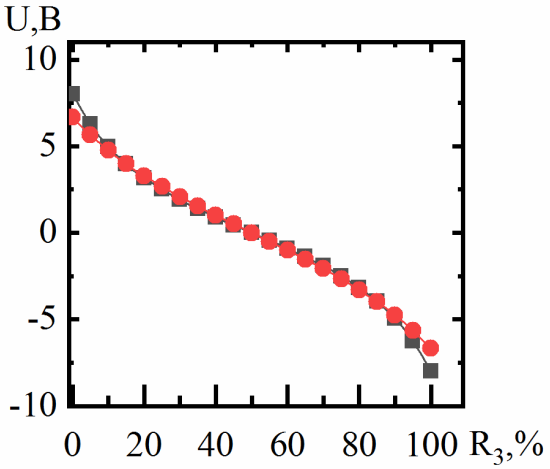

Рис. 3.5. Залежність напруги U від зміни опору R тензорезистора (напруга живлення: ■ $-U_1$,○ $-U_2$)

З графіка залежності бачимо що для не збалансованого тензорезистивного вимірювального мосту залежність вихідної напруги від зміни показників тенхорезисторів має не лінійний характер.

3.2. Дослідження реостатних датчиків.

Для дослідження реостатних датчиків за допомогою програмного забезпечення Multisim зберемо електричну схему зображену на рисунку 3.6. Задаємо значення напруга живлення V=10В, а опір на резисторі $R_3 = 1 * 10^3$Ом, $R_1 = R_н = 1 * 10^3$Ом. Змінюючи значення реостату з кроком 5% від 0 до 100%, визначимо залежність напруги на навантаженні від опору датчика. Такі модуляції робимо для значень $R_1 = 1 * 10^3$Ом, $10 * 10^3$Ом і ∞. В нашому випадку ∞ програма дала максимально допустиме значення 5 ТОм.

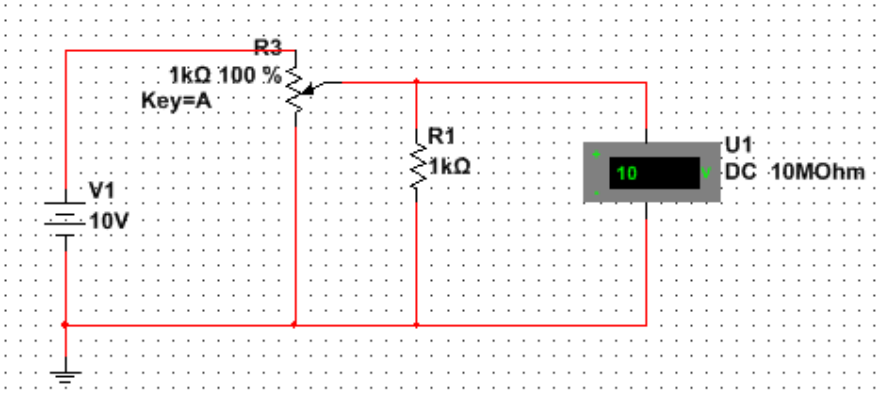

Рис. 3.6. Електрична схема ввімкнення реостатного датчика

Отримані результати дослідження реостатного датчика відображені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Результати досліджень з живленням схеми V=10В і опорами на резисторах: $R_3 = 1 * 10^3$Ом, $R_1 = 1 * 10^3$Ом, $10 * 10^3$Ом, і ∞.

R_H,кОм	R_3,%	U, В	R_H,кОм	R_3,%	U, В	R_H,кОм	R_3,%	U, В
1	0	0,001	10	0	0,001	∞	0	0,001
	5	0,47		5	0,49		5	0,5
	10	0,91		10	0,91		10	1
	15	1,33		15	1,48		15	1,5
	20	1,72		20	1,96		20	2

	25	2,10		25	2,45		25	2,5
	30	2,47		30	2,93		30	3
	35	2,85		35	3,42		35	3,5
	40	3,22		40	3,90		40	4
	45	3,60		45	4,39		45	4,5
	50	4		50	4,87		50	5
	55	4,40		55	5,36		55	5,5
	60	4,83		60	5,85		60	6
	65	5,29		65	6,35		65	6,5
	70	5,78		70	6,85		70	7
	75	6,31		75	7,36		75	7,5
	80	6,89		80	7,87		80	8
	85	7,53		85	8,39		85	8,5
	90	8,25		90	8,92		90	9
	95	9,06		95	9,45		95	9,5
	100	10		100	10		100	10

За отриманими результатами модуляції збудуємо графік залежності напруги на навантаженні від опору датчика. Графік залежності зображено на рисунку 3.7.

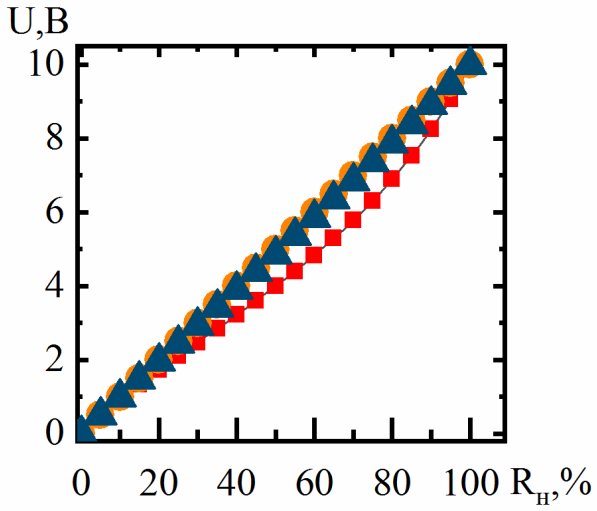

Рис. 3.7. Залежність напруги U на навантаженні від зміни опору R датчика

(опір: ■ - $1*10^3$Ом, ▲ - $10*10^3$Ом, ● - ∞)

Отримана нами залежність показує, що залежність вихідної напруги майже не залежить від загального опору потенціометричного перетворювача.

Грає істотну роль тільки положення повзунка, а відповідно і частина включеного у вимірювальне коло опору.

Дослідимо реостатний датчик за допомогою програмного забезпечення Multisim зберемо електричну схему зображену на рисунку 3.8. Задаємо значення напруга живлення V=14В, а опір на резисторі $R_3 = 1 * 10^3$Ом, $R_1 = R_н = 1 * 10^3$Ом. Змінюючи значення реостату з кроком 5% від 0 до 100%, визначимо залежність напруги на навантаженні від опору датчика. Такі модуляції робимо для значень $R_1 = 1 * 10^3$Ом, $10 * 10^3$ Ом і ∞. В нашому випадку ∞ програма дала максимально допустиме значення 5 ТОм.

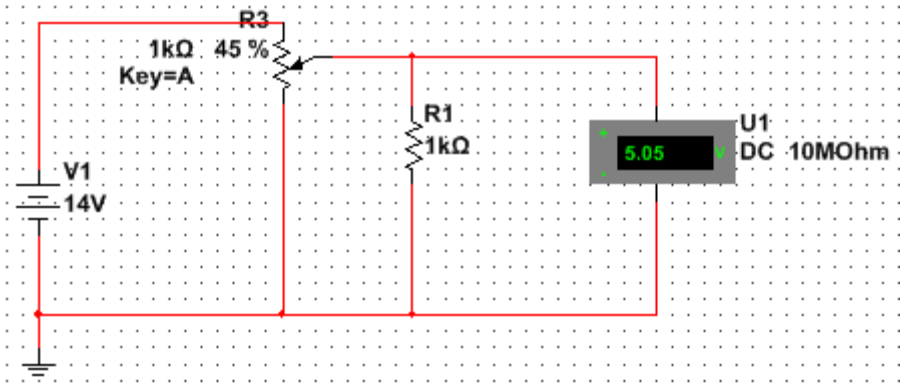

Рис. 3.8. Електрична схема ввімкнення реостатного датчика

Отримані результати дослідження реостатного датчика відображені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Результати досліджень з живленням схеми V=14В і опорами на резисторах: $R_3 = 1 * 10^3$Ом, $R_1 = 1 * 10^3$Ом, $10 * 10^3$Ом, і ∞.

R_H,кОм	R_3,%	U, В	R_H,кОм	R_3,%	U, В	R_H,кОм	R_3,%	U, В
1	0	0,014	10	0	0,014	∞	0	0,014
	5	0,66		5	0,69		5	0,7
	10	1,28		10	1,38		10	1,4
	15	1,86		15	2,07		15	2,1
	20	2,41		20	2,75		20	2,8
	25	2,94		25	3,43		25	3,5
	30	3,47		30	4,11		30	4,2
	35	3,99		35	4,79		35	4,9

	40	4,51		40	5,46		40	5,6
	45	5,05		45	6,14		45	6,3
	50	5,6		50	6,82		50	7
	55	6,17		55	7,51		55	7,7
	60	6,77		60	8,20		60	8,4
	65	7,41		65	8,89		65	9,1
	70	8,09		70	9,59		70	9,8
	75	8,84		75	10,30		75	10,5
	80	9,65		80	11,02		80	11,2
	85	10,55		85	11,75		85	11,9
	90	11,56		90	12,48		90	12,6
	95	12,69		95	13,23		95	13,3
	100	14		100	14		100	14

За отриманими результатами модуляції збудуємо графік залежності напруги на навантаженні від опору датчика. Графік залежності зображено на рисунку 3.9.

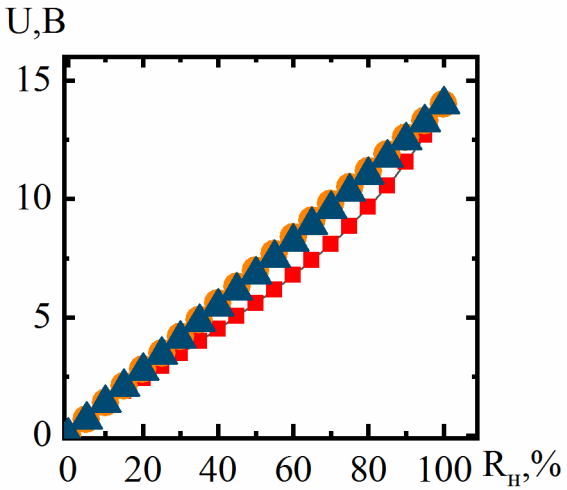

Рис. 3.9. Залежність напруги U на навантаженні від зміни опору R датчика (опір: ■ - $1*10^3$Ом, ▲ - $10*10^3$Ом, ● - ∞)

Отримана нами залежність показує, що залежність вихідної напруги майже не залежить від загального опору потенціометричного перетворювача. Збільшення показників вихідної напруги залежать від напруги живлення. Грає істотну роль тільки положення повзунка, а відповідно і частина включеного у вимірювальне коло опору.

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі проведено літературний аналіз реостатних та тензорезистивних електронних системи перетворення сигналів.
2. В ході роботи проведено порівняння різного програмного забезпечення, для модуляції експерименту і дослідження реостатної та тензорезистивної електронних систем перетворення сигналів, було обрано кращу програму Multisim. І в процесі роботи Multisim показав хороші результати, моделювання було зручним і отриманні результати були відображені у рисунках з використанням пакету програм фірми OriginLab для наукової графіки..
3. Показано що, модулювання роботи тензорезистивної мостової системи в різних діапазонах вимірювань, при дослідженні деформації об’єкта використання двох плечей тензорезистивного мосту показує гарну чутливість, і робоча характеристика має широкий діапазон. Результати вимірювань при різних значеннях величини опору плечей моста і напруги живлення, встановили однакові результати, що говорить про гарну стабільність такої вимірювальної системи при роботі в різних умовах досліджень деформації.
4. Порівняння роботи незбалансованого та збалансованого вимірювальних тензорезистивних мостів, показало істотну перевагу останнього, що проявилася у кращій лінійності робочих характеристик.
5. Проведено дослідження роботи реостатної системи перетворення неелектричних сигналів в електричні, було встановлено лінійну залежність вимірювальної напруги на всьому досліджуваному діапазоні. Отримані результати було представлено у вигляді зведеної таблиці і графіку залежності напруги від зміни опору. Встановили, що незважаючи на опір навантаження підключений до даної вимірювальної системи показники вольтметра лінійно змінюються в залежності від положення повзунка реостату та величини напруги живлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поліщук Є.С., Ванько В.М. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) Видавництво Львівської політехніки 2015 – 584с.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Датчик – [Електронний ресурс] ─ Датчик. Дата доступу 09.11.20.
3. Поліщук Е.С., Дорожовець М. М., Стадник Б. І., Івахів О. В., Бойко Т. Г., Ковальчик А. Засоби та методи вимірювань неелектричної величини: Підручник / За ред. проф. Є. С. Поліщука. - Бескид-Бт, 2008. – 618 с.
4. Шарапов В.М., Мусієнко М. П., Шарапова Е. В. П'єзоелектричні датчики / під ред. В. М. Шарапова. -, 2006. – 632 с.
5. Технічні засоби автоматизації і управління Колосов О. С.2018.– 289 с.
6. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук А3В5 / Дружинін А. О., Мар’ямова І. Й., Кутраков О. П.. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 232 с.
7. Бобренко В. М., Куценко А. М., Малахов В. П. акустичний контроль механічних напруг. - О.: Astroprint, 1997. – 272 с.
8. Осадчий Е.П., Тихонов В. І. та ін. проектування датчиків для вимірювання механічних величин / під ред. Е. П. Осадчого. - М.: Машинобудування, 1979. – 480 с.
9. https://www.ni.com/en-us/shop/electronic-test-instrumen-multisim.html.html – [Електронний ресурс] ─Multisim™. Дата доступу 19.11.20
10. https://studopedia.ru/7_93435_Multisim.html – [Електронний ресурс] ─ Multisim. Дата доступу 19.11.20.
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Micro-Cap – [Електронний ресурс] ─ Micro-Cap Дата доступу 20.11.20
12. https://forum.cxem.net/index.php?/topic/15659- [Електронний ресурс] ─ Micro-Cap Дата доступу 20.11.20
13. https://cxem.net/software/orcad.php – [Електронний ресурс] ─ OrCAD Дата доступу 20.11.20