

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

О.М. Безвесільна

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**З ДИСЦИПЛІНИ
“ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ”**

для студентів з напрямку підготовки

6.050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Освітньо-кваліфікаційний рівень “бакалавр”

Житомир - 2014

ЗМІСТ	стор.
ПЕРЕДМОВА	7
РОЗДІЛ 1. ВСТУП	8
1.1. Сфера застосування ППП. Актуальність розробки та використання ППП	8
1.2. Фактори, що визначають особливу роль ППП як елементів засобів вимірювання	10
1.3. Зв'язок ППП і різних галузей науки та техніки.....	10
1.4. Найважливіші наукові результати, досягнуті в галузі ППП.....	10
1.5. Нові завдання в галузі ППП.....	11
1.6. Місце ППП (вимірювального перетворювача) у складі сучасних засобів вимірювання	11
1.7. Види перетворень, що виконуються в приладах	13
1.8. Сигнали вимірювальної інформації.....	13
1.9. Види операцій, що виконуються з сигналами вимірювальної інформації.....	13
1.10. Основні питання аналізу та синтезу приладів.....	13
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПРИЛАДІВ	10
2.1. Загальні положення та визначення	10
2.2. Основні вимоги, що ставляться до ППП.....	12
2.3. Класифікація ППП.....	14
2.4. Загальні рівняння ППП та їх основні характеристики..	15
2.5. Загальні положення про похибки ППП.....	19
2.6. Контрольні питання до розділу 2.....	19
РОЗДІЛ 3. ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ПП)	21
3.1. Область застосування ПП	21
3.2. Основні елементи конструкції ПП	21
3.3. Параметри, що характеризують ПП.....	25
3.4. Нові типи ПП.....	29
3.5. Конструкції ПП	31
3.6. Схеми ввімкнення ПП	36
3.7. Рівняння статичної характеристики ПП	38
3.8. Похибки через нелінійність статичної характеристики ПП.....	41

3.9. Методи зменшення похибок нелінійності навантажених ПП.....	42
3.10. Розрахунок лінійних ПП	44
3.11. Функціональні ПП	49
3.12. Способи коригування ПП.....	60
3.13. Контрольні питання до розділу 3	
РОЗДІЛ 4. ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ПП) ...	65
4.1. Загальна характеристика ТП.....	65
4.2. Дротяні ТП.....	66
4.3. Ненаклеювані (вільні) ТП.....	69
4.5. Плівкові ТП.....	71
4.6. Напівпровідникові ТП	72
4.7. Основні техніко-метрологічні характеристики ТП.....	75
4.8. Розрахунок ТП.....	83
4.9. Способи ввімкнення ТП	85
4.10. Розміщення ТП на об'єкті.....	87
4.11. Приклад розрахунку ТП	88
4.12. Контрольні питання до розділу 4.....	
РОЗДІЛ 5. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНТАКТНОГО ОПОРУ (ПКО)	89
5.1. Загальна характеристика ПКО	89
5.2. Приклад практичного застосування ПКО	93
5.3. Контрольні питання до розділу 5	
РОЗДІЛ 6. ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ЄП)	95
6.1. Загальна характеристика ЄП.....	95
6.2. Основні конструктивні різновиди ЄП	96
6.3. Основні схеми ввімкнення ЄП	99
6.4. Приклад розрахунку ЄП.....	104
6.5. Приклад практичного застосування ЄП як приладу для вимірювання прискорення	105
6.6. Контрольні питання до розділу 6	
РОЗДІЛ 7. ІНДУКТИВНІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПЕРЕТ- ВОРЮВАЧІ	108
7.1. Застосування індуктивних і трансформаторних перетворю- вачів.....	108
7.2. Переваги ПП і ТрП.....	108
7.3. Недоліки й проблеми в галузі ПП і ТрП	109
7.4. Індуктивні перетворювачі.....	110

7.5. Трансформаторні перетворювачі	119
7.6. Розрахунок магнітного кола	123
7.7. Магнітна провідність повітряних ділянок магнітного кола	127
7.8. Графічний метод визначення провідностей	128
7.9. Контрольні питання до розділу 7	
РОЗДІЛ 8. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	131
8.1. Загальна характеристика п'єзоелектричних перетворювачів	139
8.2. Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів. Особливості роботи.....	141
8.3. Приклад практичного застосування п'єзоперетворювача	144
8.4. Вимоги до вимірювальної схеми п'єзоелектричного прила- ду	145
8.5. Приклади розрахунку п'єзоперетворювачів	149
8.6. Контрольні питання до розділу 8.....	
РОЗДІЛ 9. МЕХАНОТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (МП) ..	143
9.1. Загальна характеристика МП	152
9.2. Механотронний перетворювач з поздовжнім переміщенням анода відносно катода.....	153
9.3. Вимірювальні схеми МП	157
9.4. Приклади практичного застосування МП.....	160
9.5. Контрольні питання до розділу 9	
РОЗДІЛ 10. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН В МЕХАНІЧНІ	162
10.1. Магнітоелектричні перетворювачі (МЕ)	162
10.2. Електромагнітні перетворювачі (ЕП).....	176
10.3. Електро- та феродинамічні перетворювачі.....	178
10.4. Індукційні перетворювачі (ІП).....	186
10.5. Контрольні питання до розділу 10.....	
ЛІТЕРАТУРА	214

ПЕРЕДМОВА

У приладобудуванні та машинобудуванні, у системах автоматичного управління (САУ) та у сучасних інформаційних комп'ютерних вимірювальних системах широко використовуються перетворюючі пристрої приладів (ППП), які, у залежності від галузі, використання також називають “вимірювальні перетворювачі”.

Без ППП не відбувається жоден вимірювальний або автоматизований технологічний процеси.

При підготовці спеціалістів у галузі приладобудування, машинобудування, механіки, автоматизованого управління технологічними процесами питанням ППП приділяється велика увага.

В основу конспекту лекцій (КЛ) покладено цикл лекцій з однойменної дисципліни, яка викладається для студентів приладобудівного факультету кафедри приладобудування денної та заочної форм навчання Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Розділ 1. ВСТУП

1.1. Сфера застосування ППП. Актуальність розробки та використання ППП

Один із напрямків науково-технічного прогресу – вдосконалення існуючих і створення нових засобів вимірювань, зокрема ППП, які призначені для перетворення фізичних величин у зручні для вимірювань або подальших перетворень вихідні сигнали і які все ширше застосовуються як у вимірювальній техніці, так і в автоматизованих системах керування технологічними процесами.

На теперішній час велика увага приділяється подальшому розвитку інформаційно-вимірювальної техніки (і зокрема ППП), призначеної для автоматизованих систем керування. Тому актуальним є розширення виробництва приладів і ППП для наукових досліджень, контролю за станом навколишнього середовища, а також сучасних медичних приладів і апаратури. Тисячі фізичних величин (в тому числі лінійні і кутові розміри, параметри технологічних процесів) доводиться вимірювати за різноманітних, іноді несприятливих умов, що неможливо без досконалих ППП.

Подальший розвиток космічних досліджень, проникнення вимірювань в області надвисоких і наднизьких температур і тисків, частот і енергій, вивчення тасмниць живого організму, боротьба з хворобами, охорона навколишнього середовища та праці людини, коли умови вимірювань стають все складнішими, дають поштовх до створення принципово нових засобів вимірювань і насамперед ППП.

Мета даного КЛ – викласти принцип дії, основи теорії та розрахунку основних типів перетворюючих пристроїв приладів.

Завдання КЛ:

- навести основні відомості, необхідні для теоретичного вивчення пристроїв, які виконують функціональне перетворення за контрольованим або керованим фізичним параметром у процесі передачі інформації по вимірювальному колу різноманітних видів вимірювання (тиску, витрат, швидкості і т. ін.);

- надати основні положення для набуття вмінь та навичок щодо розрахунку та проектування типових перетворюючих пристроїв приладів;

- розкрити професійну, методичну направленість дисципліни, її зв'язок з іншими дисциплінами спеціальності.

У КЛ передбачено:

- викладення основних відомостей про нові досягнення вчених у галузі створення перетворюючих пристроїв приладів, удосконалення техніки наукового експерименту, що потребує, у свою чергу, створення великого класу високоточних та надійних перетворювачів,

- висвітлення основних перспективних напрямів в області вимірювальних перетворювачів;

- викладення в систематизованому вигляді методів розрахунків найбільш поширених і перспективних перетворювачів.

Мета лабораторних робіт - закріпити викладений лекційний матеріал, отримати практичні навички експериментальних досліджень, вміння аналізувати одержані експериментальні результати.

Основна мета виконання студентами контрольних робіт на ЦОМ - отримати практичні навички розрахунку вимірювальних перетворювачів на ЦОМ, закріпити лекційний матеріал.

У КЛ надано методичні вказівки при вивченні дисципліни (що особливо важливо для студентів безвідривної форми навчання), розрахунки перетворюючих пристроїв приладів, навчальні програми розрахунків перетворюючих пристроїв приладів на ЦОМ, лабораторні роботи з дисципліни, задачі з дисципліни, перелік програмних запитань.

Основні задачі, що стоять перед студентом при вивченні навчальної дисципліни:

- **набути знання:**

світоглядних проблем дисципліни ППП; основних напрямків і перспектив розвитку приладобудування, контрольної-вимірювальної техніки, ППП; математичних методів рішення задач зі спеціальності; прийомів самостійної роботи для освоєння змісту дисципліни і вивчення технічної літератури; методів проведення наукових досліджень по ППП; методики обрання відповідних ППП і математичної обробки отриманих даних на ЦОМ; предмета дисципліни ППП та його ролі у кваліфікації спеціаліста;

- **набути уміння:**

володіти раціональними прийомами пошуку і використання науково-технічної інформації в галузі ППП; використовувати сучасну обчислювальну техніку при дослідженні і проектуванні ППП; проводити наукові дослідження в галузі ППП; виконувати всі необхідні розрахунки при дослідженні і проектуванні ППП; самостійно приймати рішення, обирати критерії і методи оптимізації і оптимізувати параметри ППП; користуватися сучасним математичним апарата-

том та ЦОМ при рішенні інженерних задач в галузі ППП за профілем спеціальності.

1.2. Фактори, що визначають особливу роль ППП як елементів засобів вимірювання

Особлива роль ППП як елементів засобів вимірювань визначається такими факторами:

1. Точність багатьох засобів вимірювань, що містять первинні вимірювальні перетворювачі або ППП, здебільшого визначається точністю саме ППП, оскільки вторинні засоби вимірювань досить досконалі. Поліпшення характеристик первинних перетворювачів буде й надалі головною передумовою підвищення точності засобів вимірювань в цілому.

2. Все більшого значення набувають вимірювальні перетворювачі, принципи роботи яких ґрунтуються на нових фізичних явищах. Ці перетворювачі потребують детального вивчення й вдосконалення, зокрема уточнення їх фізичних принципів перетворення, щоб можна було отримати найбільш вірогідне рівняння перетворення і сконструювати ППП з кращими метрологічними та технічними характеристиками.

1.3. Зв'язок ППП і різних галузей науки та техніки

Розвиток вимірювальної техніки (і зокрема ППП) в значній мірі визначається досягненнями в галузі фізики, хімії та інших наук. У свою чергу, досягнення згаданих наук залежать від досконалості технічних засобів проведення наукових експериментів, тобто від досконалості ППП.

Розвитку ППП сприяли такі досягнення в галузі фізики, як відкриття явищ термоелектрики, надпровідності, ефектів Гаусса і Холла, Джозефсона та Месебауера, ядерного магнітного резонансу, а також досягнення в галузі напівпровідникової електроніки, електрохімії та інших наук.

1.4. Найважливіші наукові результати, досягнуті в галузі ППП

Енергетичне тлумачення принципу роботи вимірювальних перетворювачів (ППП), що базується на двох фундаментальних законах (законі, збереження енергії та принципі оборотності), стало передумовою для створення академіком А.А. Харкевичем основ загальної теорії вимірювальних перетворювачів і представлення цих перетворюва-

чів у вигляді пасивних чотириполіусників зі сторонами різної фізичної природи [70, 71].

Така теорія дає змогу описувати основні властивості перетворювачів, не вдаючись (до певного моменту) до розгляду конкретних перетворювачів.

Розвиток загальної теорії вимірювальних перетворювачів відображено в працях Л.О. Островського [46].

Велику роботу щодо подальшого розвитку питань теорії вимірювальних перетворювачів, систематизації фізичних явищ, що використовуються для створення первинних перетворювачів вимірювальної інформації, проведено групою Санкт-петербурзьких вчених – співробітників кафедри інформаційно-вимірювальної техніки Санкт-Петербурзького політехнічного інституту А.М. Туричиним, П.В. Новицьким, О.С. Левшиною, В.С. Гутниковим, С.А. Спектором, В.Г. Кнорингом, Е.А. Кудряшовим та ін. [67].

Фундаментальним дослідженням з питань систематизації перетворювачів фізичних величин, що випускаються промисловістю, є праця Д.І. Агейкіна та співавторів [1].

Проблему машинного синтезу систем корекції вимірювальних перетворювачів вирішено в працях П.М. Таланчука [61].

Важливу роль у розвитку вимірювальних перетворювачів температури відіграли, праці таких учених: О.М. Гордова, М.О. Яришева, механотронних перетворювачів – Г.С. Берліна [8, 9], потенціометричних – А.Т. Белевцева [6], оптико-електронних – В.Ф. Бахмутського, М.І. Гореликова, Ю.М. Кузіна [5], п'єзоелектричних – Р.Г. Джагупова, А.А. Єрофєєва [24], індукційних – О.Л. Дорофєєва [25], тензометричних – С.М. Заседателева, Л.В.Белікова [29].

Узагальнюючими в галузі побудови гальваномагнітних перетворювачів є праці О.К. Хомерики, зокрема [72].

Усе більшого значення набувають питання аналізу і синтезу вимірювальних перетворювачів, розвинуті в працях М.Т. Заріпова, Ю.І. Петрової [28], а також проблеми розвитку нових фізичних принципів і засобів перетворення фізичних величин тощо.

1.5. Нові завдання в галузі ППП

Сучасний розвиток і вдосконалення ППП, системний підхід до проектування цих засобів вимірювань ставлять перед розробниками ППП нові завдання. Для їх виконання необхідно:

1. Уніфікувати й стандартизувати конструкції первинних перетворювачів, узгоджувати основні параметри окремих перетворювачів складних вимірювальних пристроїв і систем, вдосконалюючи методи корекції їх характеристик.

2. Застосовувати комплексний підхід до проектування і використання первинних перетворювачів з урахуванням конкретних умов їх експлуатації, спираючись на конструктивні, технологічні та структурні методи поліпшення їх характеристик.

3. Встановлювати залежності між метрологічними характеристиками та конструктивними параметрами перетворювача для визначення оптимальних значень останніх.

1.6. Місце ППП (вимірювального перетворювача) у складі сучасних засобів вимірювання

Сучасна вимірювальна техніка дає змогу отримувати, передавати, перетворювати, зберігати контрольну інформацію, порівнювати контрольну та програмну інформацію, а також формувати командну інформацію для впливу на процес, яким керують.

Засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації в формі, доступній для безпосереднього сприймання спостерігачем, називають приладом [39].

Прилади є поєднанням найпростіших функціональних комірок – елементів і пристроїв, що виконують одну або декілька операцій з сигналами, які проходять через вимірювальну частину.

Елемент засобу вимірювань, в якому відбувається одне з ряду перетворень величини, називають перетворюючим елементом засобу вимірювань. Перетворюючий елемент не завжди конструктивно виділений, тобто один елемент конструкції засобу вимірювань може містити два і більше перетворюючі елементи, які утворюють ППП.

Перетворюючі елементи, які виконують однакові функції, тобто однакові операції з сигналами, можуть мати найрізноманітніші принципи дії. Цим зумовлюється пошук найкращих розв'язків кожної конкретної задачі зі створення новітніх засобів вимірювань.

1.7. Види перетворень, що виконуються в приладах

Вимірювальну інформацію подають в формі сигналів. Під сигналом вимірювальної інформації розуміють сигнал, функціонально пов'язаний з фізичною величиною, що вимірюється, тобто мають на увазі умовну зміну дійсного (довжина, форма, колір тощо) або енергетичного (струм, напруга, тиск) параметра, однозначно пов'язану з інфо-

рмациєю, що сприймається або передається. В автоматичних пристроях в якості сигналів здебільшого використовують енергетичні параметри, оскільки їх легко генерувати, формувати, передавати та перетворювати.

1.8. Сигнали вимірювальної інформації

Як сигнали застосовуються такі параметри:

- 1) в разі використання електричної енергії – сила струму, напруга, амплітуда, тривалість імпульсу, частота і т. ін.;
- 2) в разі використання енергії стисненого газу – величина тиску, потоку газу;
- 3) в разі використання енергії рідини під тиском – величина тиску, потоку рідини;
- 4) в разі використання механічної енергії – величина сили (моменту), переміщення (лінійного або кутового), швидкості (лінійної або кутової) тощо.

1.9. Види операцій, що виконуються з сигналами вимірювальної інформації

У процесі роботи вимірювального кола приладу або автоматичного пристрою з сигналами вимірювальної інформації в загальному випадку потрібно виконати такі операції:

- 1) отримати сигнал, однозначно пов'язаний з інформацією про параметр, що контролюється;
- 2) перетворити сигнал за родом енергії (наприклад, механічний сигнал в електричний);
- 3) перетворити сигнал за видом (наприклад, безперервний сигнал в імпульсний тощо);
- 4) перетворити сигнал за величиною (підсилити);
- 5) перетворити сигнал за функціональною залежністю між вхідними та вихідними сигналами;
- 6) порівняти сигнали;
- 7) розподілити сигнали за різними шляхами;
- 8) забезпечити зберігання сигналів та їх використання для впливу на процес, яким керують.

1.10. Основні питання аналізу та синтезу приладів

Проблема вдосконалення приладів, тобто поліпшення їх точнісних характеристик, підвищення надійності тощо, тісно пов'язана з розв'язанням питань аналізу та синтезу приладів.

Під аналізом розуміють комплексні всебічні дослідження приладу, в результаті яких визначаються його основні характеристики за даних умов експлуатації. Синтез – це створення нових приладів, що мають наперед задані характеристики.

Основні етапи синтезу:

- 1) вибір методу вимірювання;
- 2) розробка структурної схеми;
- 3) знаходження характеристик ланок (ППП) і порівняння їх з потрібними характеристиками для визначення похибок;
- 4) визначення характеристик і похибок приладу в цілому на основі перетворення структурної схеми.

Отже, один з головних етапів під час розробки приладу – це розрахунок характеристик ППП і обґрунтування їх вибору.

Контрольні питання до розділу 1

1. Які параметри застосовуються як сигнали вимірювальної інформації?
2. Які операції виконують в загальному випадку з сигналами вимірювальної інформації?
3. Що розуміють під сигналом вимірювальної інформації?
4. Дайте визначення перетворюючому елементу засобів вимірювань.
5. Що таке синтез і аналіз приладів?

Розділ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ПРИЛАДІВ

2.1. Загальні положення та визначення

Сучасні засоби вимірювання складаються з вимірювальних перетворювачів, певним чином пов'язаних між собою (рис. 2.1).

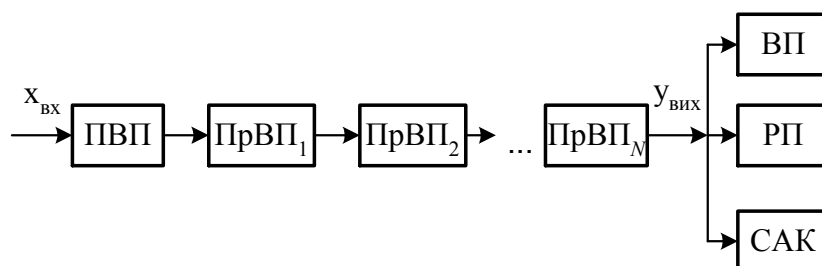


Рис. 2.1. Функціональна схема засобу вимірювання

Первинна інформація $x_{вх}$ надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача (ПВП), який функціонально пов'язаний з проміжними вимірювальними перетворювачами (ПрВП₁, ПрВП₂, ..., ПрВП_N) так, що вихідна величина $y_{вх} = y_{вх}(x_{вх})$ (рис. 2.1).

Поточне значення $y_{вх}(t)$ може подаватися на відліковий (ВП) і реєструючий (РП) пристрої, на вхід системи автоматичного керування (САК) або на інші системи, в яких використовується інформація $y_{вх}(t)$.

Вимірювальний перетворювач – це засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передавання, подальшого перетворення та зберігання, але такої, що не може безпосередньо сприйматися спостерігачем [39].

Для прикладу розглянемо найпростіший однокомпонентний вимірювач (акселерометр) лінійних прискорень a маятникового типу (рис. 2.2), функціональну схему якого зображено на рис. 2.3.

Якщо точка підвісу маятника рухатиметься з прискоренням a , то під дією сили інерції $P=ta$ маса маятника t відхилиться від вертикального положення на кут $\alpha = \alpha(a)$.

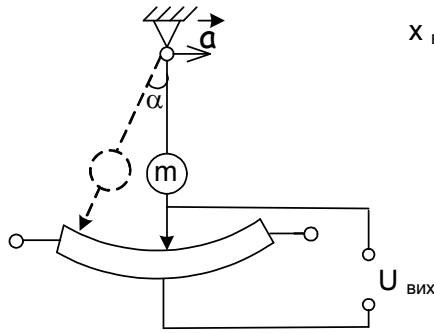


Рис. 2.2. Акселерометр

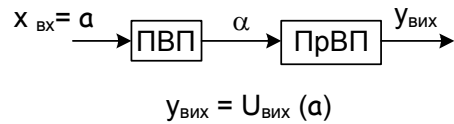


Рис. 2.3. Функціональна схема акселерометра

При цьому повзунок вихідного потенціометра переміститься і на виході буде напруга

$$u_{вих} = u_{вих}(a) \quad (2.1)$$

В даному вимірювачі лінійних прискорень первинним вимірювальним перетворювачем є маятник, який перетворює вимірюване прискорення a у кут нахилу маятника α .

Таким чином, ПВП – це перетворювач, до якого підведено вимірювану величину, тобто перший перетворювач у вимірювальному колі. Вимірювальне коло – це сукупність вимірювальних перетворювачів, що забезпечують всі перетворення сигналу вимірювальної інформації.

Чутливий елемент – частина першого у вимірювальному колі перетворюючого елемента, яка перебуває під безпосереднім впливом вимірюваної величини.

У зазначеному прикладі чутливим елементом є маса маятника m , оскільки інерційні сили, що виникають при появі прискорення, насамперед діють на неї.

Потенціометричний перетворювач застосовується як проміжний вимірювальний перетворювач.

Проміжний вимірювальний перетворювач розміщений у вимірювальному колі після ПВП і призначається для дистанційного передавання вимірювальної інформації (наприклад, пристрій дистанційного передавання).

Масштабний вимірювальний перетворювач призначається для зміни вимірюваної величини (або проміжної інформації) у задане число

разів (наприклад, подільник напруги, трансформатор, підсилювач тощо).

2.2. Основні вимоги, що ставляться до ППП

До вимірювальних перетворювачів ставляться такі основні вимоги:

- висока надійність на весь термін служби або на міжремонтний строк;
- достатня стабільність характеристик під час зберігання та експлуатації;
- відповідність діапазонів зміни вхідних і вихідних величин;
- допустима інерційність у перетворенні вимірювальної інформації;
- відсутність зворотного впливу вихідної величини на вхідну і мінімально допустимий вплив на роботу попередніх вимірювальних перетворювачів.

Стабільність характеристик у часі t визначається стабільністю залежності

$$y_{вих} = f(x_{вх}), \quad (2.2)$$

причому зміна вихідної величини

$$\Delta y_{вих} = \Delta y_{вих}(t) \leq \Delta y_{вих.доп} \quad (x_{вх} = const), \quad (2.3)$$

де $\Delta y_{вих.доп}$ – допустима зміна в часі вихідної величини.

У найпростішому випадку, якщо

$$y_{вих} = k_x x_{вх} \quad (2.4)$$

(k_x – передаточний коефіцієнт), то стабільність перетворювача визначається співвідношенням

$$k_x(t) = const$$

або

$$\Delta k_x \leq \Delta k_{доп} \quad (2.5)$$

$\Delta k_{доп}$ – допустима зміна передаточного коефіцієнта.

В умовах експлуатації перетворювачів

$$k = k(t, P, \Theta^0, n \dots), \quad (2.6)$$

де t – час; P – тиск навколишнього середовища; Θ^0 – його температура; n – перевантаження.

Тому в загальному випадку стабільність характеристики перетворювача визначається стабільністю залежності

$$k = k(t, \Theta^0, P, n \dots) = const$$

або

$$\Delta k(t, \Theta^0, P, n, \dots) \leq k_{\text{дон}} \quad (2.7)$$

Відповідність діапазонів зміни вхідної та вихідної величин визначається за формулами

$$x_{\text{ex min}} \leq x_{\text{ex}}(t) \leq x_{\text{ex max}} \quad (2.8)$$

$$y_{\text{вих min}} \leq y_{\text{вих}}(t) \leq y_{\text{вих max}}$$

Допустима інерційність визначається сталими часу перехідної функції перетворювача. Наприклад, якщо динаміка перетворювача описується рівнянням виду

$$(Tp + 1)y_{\text{вих}} = kx_{\text{ex}}, \quad (2.9)$$

то інерційність перетворення сигналу визначається сталою часу T перетворювача.

У такому разі допустима інерційність

$$T \leq T_{\text{дон}}$$

Для випадку, коли рівняння динаміки вищого порядку зі сталими часу $T_n, T_{n-1}, \dots, T_2, T_1$, допустима інерційність визначається наведеними далі нерівностями, які повинні виконуватися:

$$T_n \leq T_{n \text{ дон}};$$

$$T_{n-1} \leq T_{n-1 \text{ дон}};$$

.....

$$T_2 \leq T_{2 \text{ дон}};$$

$$T_1 \leq T_{1 \text{ дон}}.$$

Запізнювання у перетворювачі можна знайти із залежності (рис. 2.4):

$$\begin{aligned} y_{\text{вих}}(t) &= f[x_{\text{ex}}(t - \tau)]; \\ t \leq \tau \quad y_{\text{вих}} &= 0, \text{ якщо } x_{\text{ex}} \neq 0; \\ t > \tau \quad y_{\text{вих}} &\neq 0, \text{ якщо } x_{\text{ex}} \neq 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

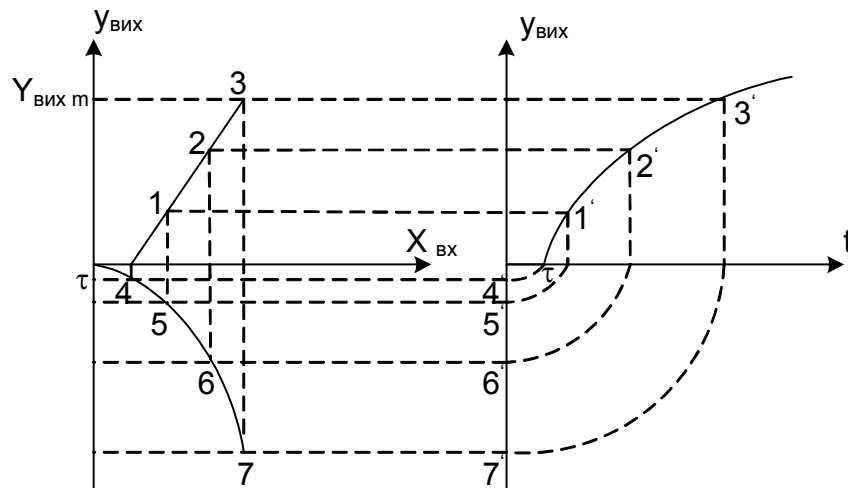


Рис. 2.4. До визначення поняття запізнювання

2.3. Класифікація ППП

Перетворювальні пристрої приладів, або вимірювальні перетворювачі, можна класифікувати за такими основними ознаками:

- фізичні величини, які підлягають перетворенню, вид вхідної та вихідної інформації як функцій часу;
- місце, що займає ППП у вимірювальному колі;
- наявність джерела енергії, що споживається перетворювачем;
- характер залежності вихідної величини від вхідної;
- властивість оборотності.

За фізичними величинами, що підлягають перетворенню, ППП, які становлять вимірювальну систему приладу, утворюють такі основні групи перетворювачів: електромеханічні, гідравлічні та пневматичні; частотні електромеханічні; перетворювачі аналогових величин у цифрові та цифрових у аналогові; оптоелектричні; магнітопружні тощо.

Електромеханічні перетворювачі можна поділити на перетворювачі механічних величин у електричні і перетворювачі електричних величин у механічні.

До перетворювачів механічних величин у електричні належать потенціометричні, тензометричні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, смісні, індуктивні та трансформаторні, п'єзоелектричні та механотронні перетворювачі; до перетворювачів електричних ве-

личин у механічні – магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні та феродинамічні, індукційні перетворювачі, виконавчі двигуни постійного та змінного струму тощо.

За видом вхідної та вихідної інформації як функцій часу вимірювальні перетворювачі поділяють на перетворювачі неперервної величини в неперервну, неперервної величини в дискретну, дискретної величини в неперервну, дискретної величини в дискретну;

– за місцем у вимірювальному колі: первинні, проміжні, передавальні, масштабні;

– за наявністю джерела енергії, яку споживає перетворювач: параметричні, які функціонують лише зі стороннім (зовнішнім) джерелом живлення (наприклад, ємнісний, трансформаторний перетворювач тощо), генераторні перетворювачі, які функціонують без стороннього джерела енергії (наприклад, термопара, тахогенератор тощо):

– за характером залежності вихідної величини від вхідної: лінійні, в яких $y_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}}$, де $x_{\text{вх}} = \text{const}$; нелінійні, в яких $y_{\text{вих}} = f(x_{\text{вх}})$, де $f(x_{\text{вх}})$ – нелінійна функція (наприклад, $y_{\text{вих}} = \sin(x_{\text{вх}})$ або $y_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}}^2$).

– за властивістю оборотності: необоротні (потенціометричні, механотронні перетворювачі тощо) та оборотні (електромагнітні перетворювачі тощо).

2.4. Загальні рівняння ППП та їх основні характеристики

У загальному випадку процес перетворення інформації є динамічним і його можна описати відповідним диференціальним рівнянням, що характеризує залежність вихідної величини перетворювача від вхідної та їх похідних, а також від зовнішніх факторів, що впливають на роботу ППП, тобто

$$F(y_{\text{вих}}, \dot{y}_{\text{вих}}, \ddot{y}_{\text{вих}}, \dots, y_{\text{вих}}^{(n)}, t, x_{\text{вх}}, \dot{x}_{\text{вх}}, \ddot{x}_{\text{вх}}, \dots, \dots, x_{\text{вх}}^{(m)}, f_{\text{в1}}, f_{\text{в2}}, \dots, f_{\text{вv}}) = 0, \quad (2.11)$$

де F – в загальному випадку нелінійна функція; $\dot{x}_{\text{вх}}, \ddot{x}_{\text{вх}}, \dots, x_{\text{вх}}^{(m)}$ – похідні від вхідної величини за часом; $f_{\text{в1}}, f_{\text{в2}}, \dots, f_{\text{вv}}$ – збудуючі фактори, які впливають на роботу перетворювача; $\dot{y}_{\text{вих}}, \ddot{y}_{\text{вих}}, \dots, y_{\text{вих}}^{(n)}$ – похідні від вхідної величини за часом.

Рівняння (2.11) – це один з різновидів математичної моделі вимірювального перетворювача.

Отже, рівнянням вимірювального перетворювача називатимемо математичні часові залежності вихідної величини від вхідної і від збурень, що впливають на процес перетворення.

У деяких випадках рівняння вимірювального перетворювача, що враховує динаміку процесу перетворення, можна подати у вигляді рівняння

$$\begin{aligned} F_{вих}(y_{вих}, \dot{y}_{вих}, \ddot{y}_{вих}, \dots, y_{вих}^{(n)}, t) = \\ F_{вх}(x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх}, \dots, x_{вх}^{(m)}, f_{e1}, \dots, f_{ev}), \end{aligned} \quad (2.12)$$

яке називають динамічним рівнянням, або динамічною моделлю, вимірювального перетворювача.

Рівняння усталеного режиму (математична модель в усталеному режимі), яке визначає залежність вихідної величини від вхідної в усталеному режимі (при $t=\infty$) роботи перетворювача, можна отримати з рівняння (2.12), якщо

$$\begin{aligned} \dot{y}_{вих} = 0, \ddot{y}_{вих} = 0, \dots, y_{вих}^{(n)} = 0; \\ \dot{x}_{вх} = 0, \ddot{x}_{вх} = 0, \dots, x_{вх}^{(m)} = 0. \end{aligned}$$

Тоді рівняння (2.12) набуває вигляду

$$F_{вих}(y_{вих}) = F_{вх}(x_{вх}, f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{ev}), \quad (2.13)$$

Останнє рівняння часто записують так:

$$y_{вих} = F_{вх}(x_{вх}, f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{ev}), \quad (2.14)$$

Якщо вплив зовнішніх факторів зведено до допустимого мінімуму, то рівняння (2.14) можна спростити:

$$y_{вих} = F_{вх}(x_{вх}). \quad (2.15)$$

Рівняння виду (2.15) називають статичним рівнянням, градуювальною або статичною характеристикою. Статичне рівняння вимірювального перетворювача визначає залежність вихідної величини від вхідної в статичному режимі роботи.

Статичні характеристики бувають лінійні та нелінійні. Лінійною статичною характеристикою ППП є тоді, коли вихідний параметр лінійно залежить від вхідного. З рис. 2.5, а бачимо, що при

$$\begin{aligned}
 -x_{\text{вх.м}} \leq x_{\text{вх}} \leq x_{\text{вх.м}}; \\
 -y_{\text{вих.м}} \leq y_{\text{вих}} \leq +y_{\text{вих.м}}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

виконується рівняння

$$y_{\text{вих}} = k_x x_{\text{вх}},$$

де k_x – коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача, або його чутливість.

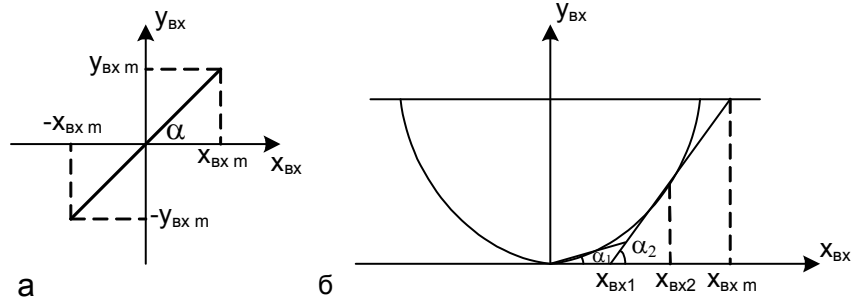


Рис. 2.5. Статична характеристика ППП: а – лінійна; б – нелінійна

Чутливість характеризується кутом α нахилу лінійної характеристики:

$$k_x = \frac{y_{\text{вих}}}{x_{\text{вх}}} = \text{tg } \alpha = S_x.$$

У разі нелінійної статичної характеристики вимірювального перетворювача вихідна величина нелінійно залежить від вхідної (рис. 2.5, б), тобто

$$y_{\text{вих}} = y_{\text{вих}}(x_{\text{вх}}),$$

де $y_{\text{вих}}(x_{\text{вх}})$ – нелінійна функція.

Отже, чутливість вимірювального перетворювача є функцією вхідної величини:

$$S_x(x_{\text{вх}}) = \frac{dy_{\text{вих}}}{dx_{\text{вх}}}.$$

Наприклад, якщо (рис. 2.5, б)

$$y_{\text{вих}} = ax^2,$$

То

$$S_x(x_{ex}) = 2ax_{ex}.$$

У загальному випадку

$$y_{вих} = y_{вих}(x_{ex}, f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{ev}),$$

тоді

$$S_x = k_x(\dot{x}, \dot{f}_{e1}, \dot{f}_{e2}, \dots, \dot{f}_{ev}).$$

Наприклад, на практиці чутливість існуючих вимірювальних перетворювачів

$$S_x = S_x(\Theta^o, P, n, \dots) = \text{var},$$

якщо змінюється будь-який з параметрів

$$\Theta^o = \text{var}, P = \text{var}, n = \text{var}.$$

Реальні вимірювальні перетворювачі мають поріг чутливості, який характеризується найменшим значенням вхідної величини $x_{вх0}$, при якому на виході перетворювача з'являється вихідна величина (рис. 2.6).

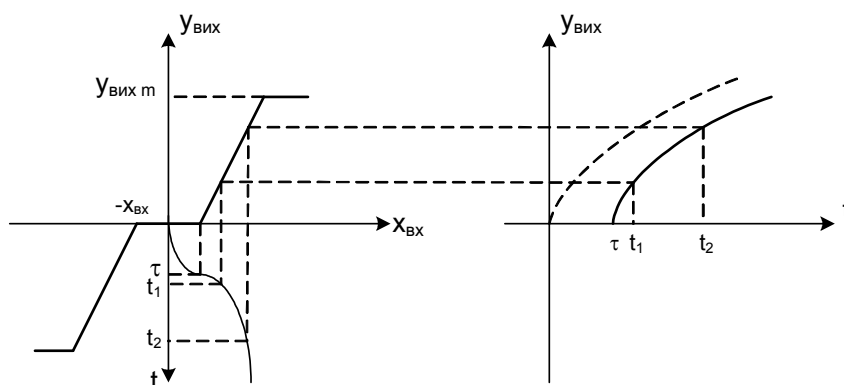


Рис. 2.6. До визначення порогу чутливості

Очевидно, що наявність у характеристиці ППП порогу чутливості спричиниться до появи в процесі перетворення часового запізнювання τ . При цьому

$$y_{вих}(t) = k_x x_{ex}(t - \tau).$$

Реальні вимірювальні перетворювачі мають свої діапазони перетворень, які характеризують область значень вхідної вели-

чини, для якої нормовані допустимі похибки вимірювального перетворювача:

$$D = x_{ex.max} - x_{ex.min},$$

Якщо

$$\Delta y_{вих} \leq \Delta y_{вих.доп},$$

де $\Delta y_{вих.доп}$ – допустимі значення похибок вихідної величини.

У разі симетричної статичної характеристики (див. рис. 2.1, а) діапазон перетворень

$$D = x_{ex.m} - (-x_{ex.m}) = 2x_{ex.m}.$$

2.5. Загальні положення про похибки ППП

Розрізняють абсолютні похибки перетворювача за входом і за виходом.

Абсолютна похибка ППП за входом – це різниця між значенням $x_{вх}^*$ вхідної величини реального перетворювача (яке називають приладним) і істинним її значенням в усталеному режимі роботи:

$$\Delta x_{вх} = x_{вх}^* - x_{вх}.$$

При цьому приладне значення $x_{вх}^*$ обчислюють за відповідною статичною характеристикою перетворювача $y_{вих}^*(x_{вх}^*)$.

Абсолютна похибка ППП за виходом є різницею (рис. 2.7) між значенням вихідної величини реального перетворювача $y_{вих}^*$ в усталеному режимі його роботи (при $t \rightarrow \infty$) і її істинним значенням за відсутності похибок вхідної величини ($\Delta x_{вх} = 0$):

$$\Delta y_{вих} = y_{вих}^*(\infty) - y_{вих}.$$

Динамічна похибка вимірювального перетворювача – це різниця між значенням вихідної величини $y_{вих}^*(t)$ в перехідному режимі і її значенням $y_{вих}^*(\infty)$ в усталеному режимі (рис. 2.7):

$$\Delta y_{вих.д}(t) = y_{вих}^*(t) - y_{вих}^*(\infty).$$

Інструментальна похибка ППП – це різниця між приладним значенням вихідної величини і її істинним значенням у всіх режимах роботи:

$$\Delta y_{вих}(t) = y_{вих}^*(t) - y_{вих}(t).$$

Очевидно, що

$$\Delta y_{\text{вих}}(t) = \Delta y_{\text{вих.д}}(t) + \Delta y_{\text{вих.ст.}}$$

При $t \rightarrow \infty \Delta y_{\text{вих.д}}(t) \rightarrow 0, \Delta y_{\text{вих}}(t) \rightarrow \Delta y_{\text{вих.ст.}}$

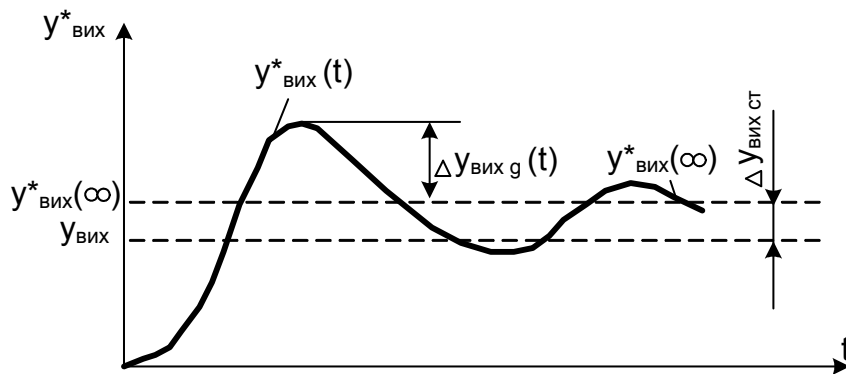


Рис. 2.7. До визначення динамічної похибки ППП

2.6. Контрольні питання до розділу 2

1. Дайте визначення чутливому елементу приладу.
2. Дайте визначення вимірювальної мережі.
3. Дайте визначення вимірювальному перетворювачу.
4. Дайте визначення первинному, проміжному, масштабному вимірювальному перетворювачу.
5. Сформулюйте основні вимоги до перетворюючих пристроїв приладів.
6. Дайте визначення математичній моделі ППП.
7. Дайте визначення рівнянню динаміки ППП.
8. Дайте визначення рівнянню статички ППП.
9. Дайте визначення чутливості ППП.
10. Дайте визначення абсолютній та відносній похибкам ППП.

Розділ 3. ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ПП)

3.1. Область застосування ПП

Потенціометричні перетворювачі широко застосовуються в різних системах автоматики, лічильно-розв'язувальних пристроях і системах слідкуючого привода. Найчастіше вони перетворюють лінійні і кутові переміщення у відповідні напруги і застосовуються як подільники напруги. У лічильно-розв'язувальних пристроях ці перетворювачі використовуються для виконання різних математичних операцій.

Потенціометричні перетворювачі належать до групи перетворювачів активного опору. Іноді їх називають реостатними або резистивними елементами [1; 6; 16; 17; 30; 38; 45; 50 та ін.].

3.2. Основні елементи конструкції ПП

Потенціометричний перетворювач – це потенціометр, движок (щітка) якого механічно пов'язаний з попереднім елементом вимірювальної системи. Виходом попереднього елемента, тобто входом ПП, є лінійне або кутове переміщення.

ПП мають такі переваги [50; 51; 67; 74]:

- 1) здатність працювати як на змінному, так і на постійному струмі;
- 2) порівняно невеликі маси і габаритні розміри;
- 3) мало піддаються завадам з боку зовнішніх електричних і магнітних полів;
- 4) відсутність фазового зсуву вихідного сигналу;
- 5) можливість побудови перетворювачів із заданою характеристикою;
- 6) можливість отримання лінійної характеристики в широкому діапазоні вхідної величини (так, для ПП з кутовим переміщенням движка вхідна величина може змінюватися в діапазоні $\pm 180^\circ$, а в спеціальних конструкціях потенціометрів – до кількох тисяч градусів);
- 7) висока точність відтворення заданої залежності приросту опору від переміщення движка.

До недоліків ПП можна віднести:

- 1) наявність зворотної дії у вигляді моменту сил сухого тертя;
- 2) обмежений строк служби в зв'язку з наявністю деталей, що піддаються впливу тертя;
- 3) дискретний характер приросту вихідного сигналу;
- 4) невисока надійність, особливо під час роботи в умовах вібрацій та інерційних перевантажень;

5) під час переміщення щітки відносно обмотки ПП, а також в умовах вібрації можливе короткочасне порушення контакту, що спричиняє появу шуму на виході перетворювача, причому амплітуда шуму може наближатися до значення корисного сигналу. У результаті дії шумів нормальна робота наступних елементів схеми (підсилювача, виконавчого пристрою тощо), а іноді й усієї схеми виявляється порушеною. Ще шкідливіший вплив на систему мають шуми в тому разі, коли сигнал з датчика надходить на диференціюючий пристрій.

Розглянемо конструкцію одного з найпростіших і найпоширеніших ПП – однообертового кільцевого потенціометра з обмежено-круговим переміщенням движка, схему якого зображено на рис. 3.1, де 1 – ізолюваний каркас; 2 – намотаний на ньому ізолюваний дріт; 3 – струмознімаючий движок (щітка), що ковзає по дроту; 4 – струмознімаюче кільце; 5 – приводний валик. Ізоляція дроту для забезпечення електричного контакту з движком зачищена.

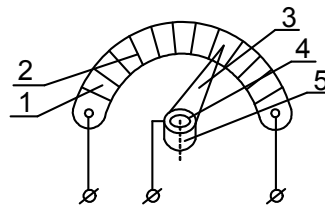


Рис. 3.1. Схематичне зображення конструкції ПП

Напругу живлення подають до двох крайніх затискачів, вихідне значення напруги знімають між одним з крайніх і середнім затискачем, з'єднаним зі струмознімаючим кільцем 4, по якому ковзає щітка 3. Приводний валик 5 електричне ізолюваний від решти елементів движка.

Матеріали спіралі обмотки – це звичайно емальований або оксидований дріт високого опору, виконаний з манганіну, ніхрому, константану, сплаву паладію з вольфрамом, сплаву платини з іридієм, платини з міддю, паладію зі сріблом, золота з нікелем.

До матеріалу спіралі висуваються такі основні вимоги: великий питомий опір, підвищена стабільність характеристик у часі, малий температурний коефіцієнт опору, достатньо висока твердість, коро-

зійна стійкість, висока якість ізоляції, велика міцність на розрив і мале подовження при розтягу.

У приладобудуванні для намотування потенціометрів використовують в основному дріт діаметром 0,03...0,3 мм.

Для обмотки ПП середньої точності використовують константан, ніхром, манганін; для високоточних ПП – сплави на основі благородних металів – платини, золота, срібла, паладію (табл. 3.1). Це пояснюється тим, що константан, наприклад, має порівняно невисоку температуру нагрівання, ніхром – великий температурний коефіцієнт опору, а манганін швидко окислюється. Сплави на основі благородних металів хімічно нейтральні і не піддаються корозії навіть при високій температурі.

У табл. 3.1 наведено значення питомого опору матеріалів, з яких найпридатніший для намотування ПП середньої точності константан, що витримує температуру нагрівання до 500°C, є міцним і хімічно стійким матеріалом. Коливання ρ пов'язані з відхиленнями в складі сплаву. Звичайно для константану в розрахунках беруть $\rho=0,49$ Ом·мм²/м.

Матеріали спіралі і каркаса добирають так, щоб їх температурні коефіцієнти розширення відрізнялися незначно. В іншому разі під час зміни температури перетворювача спіраль може ослабнути і в ній виникнуть незначні механічні пошкодження.

Температурне напруження, що виникає в ПП, дорівнює:

$$\sigma_t = E_{op} (\beta_k - \beta_{op})(t_p - t_n),$$

де $E_{др}$ – модуль пружності матеріалу дроту ПП; β_k , $\beta_{др}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення відповідно каркасу та дроту; t_p , t_n – робоча температура й температура під час намотування. Початкове напруження, створене під час намотування,

$$\sigma_n = \frac{F_n}{q_{др}},$$

де F_n – зусилля натягу дроту під час намотування; $q_{др}$ – площа поперечного перерізу дроту.

Таблиця 3.1

Матеріали дроту для обмоток потенціометрів

Сплав	Хімічний склад, %	Питомий опір ρ при 20°C, Ом·мм ² /м	Температурний коефіцієнт опору, град ⁻¹
Константан	Cu 54-67, Ni 30-45, Mn 1-3	0,48 ... 0,52	-0,000005
Ніхром	Ni 55-80, Cr 14-20, Fe 14-18, Mn 1-2	1,05 ... 1,12	-0,00013
Платина-іридій	Pt 90±0,4, Ir 10±0,6	0,230 ... 0,315	-0,00013
Платина-іридій	Pt 75±0,5, Ir 25±1	0,315	-0,00095
Платина-нікель	Pt 93-95, Ni 5-7	0,11 ... 0,50	+(0,00022 ... 0,00071)
Платина-мідь	Pt 90-98, Cu 2-9,5	0,15 ... 0,57	+(0,00020 ... 0,00183)
Паладій-срібло	Pd 30-36, Ag 63-70	0,14 ... 0,16	+(0,00032 ... 0,0004)
Золото-нікель	Au 89-95, Ni 4-10	0,085 ... 0,50	+(0,00023 ... 0,00094)

Під час проектування ПП має виконуватися нерівність

$$0 < \sigma_n + \sigma_t < \sigma_{доп},$$

де $\sigma_{доп}$ – допустиме напруження ПП.

У процесі роботи ПП відбувається зношування матеріалів, яке в разі ковзного тертя визначається виразом

$$W_3 = k_3 \frac{F_{щ} x_{щ}}{H},$$

де W_3 – об'єм зношеного матеріалу, см ; k_3 – безрозмірний коефіцієнт (наприклад, для пари фосфориста бронза – константан в умовах легкого мащення $k_3=6$); $F_{щ}$ – сила натиснення щітки, кгс; $x_{щ}$ – шлях, пройдений щіткою, см; H – твердість зношеного матеріалу, кг/см .

Як ізоляційне покриття дроту спіралі найчастіше застосовується емаль або плівка оксидів товщиною 10 мкм. У місці дотикання щітки ізоляція зачищається і контактна поверхність ретельно полірується

наждачним або полірувальним папером, шліфувальним або фетровим кругом.

Вибираючи матеріал каркаса, враховують його діелектричні, антикорозійні та антимагнітні властивості.

Якщо вимоги до жорсткості та точності розмірів каркаса невисокі, використовують різні неметалічні матеріали: текстоліт марок А, Б, В; гетинакс марок А, В, АВ; ебоніт, органічне скло, пресовану кераміку. Недоліки неметалічних матеріалів: гігроскопічність, низькі теплопровідність і теплоємність.

У разі високих вимог до жорсткості та точності використовують каркаси з алюмінієвих сплавів АМг, Д1, Д16 тощо. Металеві каркаси ізолюють різноманітними лаками (часто з попереднім анодуванням), які дають змогу досягти більшої густини струму в обмотці.

Щітка ПП може бути виконана у вигляді окремих дротиків (з кількох жил дроту), пластинчастих щіток (або їх пакета), стержня або ролика циліндричної форми.

Матеріал щітки повинен мати високу зносостійкість і корозійну стійкість, легко оброблятися, забезпечувати стійкий контакт між струмознімаючим елементом движка й обмоткою, а також стабільний невеликий перехідний опір між щіткою та обмоткою.

Щітки виготовляються з неблагородних (у цьому разі немінуча нестабільність перехідного опору, спричинена перепадом температури, впливом домішок, що містяться в повітрі, утворенням оксидних плівок) і благородних металів типу платини, іридію, паладію та їх сплавів (платина-іридій, паладій-іридій, паладій-срібло-кобальт).

Контактний тиск забезпечується гнучкістю движка і коливається для різних конструкцій щіток у межах $(3...100) 10^{-3}$ Н.

Фізико-механічні властивості найбільш поширених матеріалів для струмознімаючих елементів щіток наведено в табл. 3.2.

3.3. Параметри, що характеризують ПП

1. Загальний опір. Загальний омичний опір типових дротяних потенціометрів залежить від їх габаритних розмірів, марки та матеріалу дроту. Неточні (так звані підстроювальні) потенціометри мають опір 5...20000 Ом, потенціометри підвищеної точності – 100...100000 Ом, в окремих випадках – до 1000000 Ом.

Розміри дротяних потенціометрів залежать від значення загального опору, заданого значення лінійності та номінальної потужності розсіювання. Зовнішній діаметр корпусу кільцевих потенціометрів звичайно дорівнює 10...80 мм, в окремих випадках він може досягати 450 мм.

2. Закон зміни опору. Під час переміщення струмознімаючого движка по резистивному елементу потенціометра залежно від його конструкції вихідна напруга змінюється за деяким заданим законом (лінійним, логарифмічним, синусно-косинусним тощо).

Найчастіше в схемах автоматики та обчислювальної техніки використовують ПП з лінійною залежністю. Промислове виробництво їх становить 60% загального числа потенціометрів, що виготовляються.

3. Лінійність. В ідеальному випадку лінійний ПП повинен мати сталу величину зміни вихідної напруги при рівних переміщеннях движка. Насправді цього ніколи не буває, тобто рівні за величиною переміщення движка спричиняють неоднакові прирости вихідної напруги.

Величину відхилення вихідної напруги для будь-якої точки обмотки від прямої лінії графіка “переміщення движка – напруга” називають відхиленням від лінійності або нелінійності. Допуск на лінійність подають у процентах до повного опору ПП і звичайно беруть 0,5...2%.

4. Допуск на загальний опір. Намотувальний дріт має розкид значень діаметру, в результаті чого змінюється його опір. Це приводить до того, що загальний опір виявляється однаковим у однотипних ПП.

Для забезпечення заданої крутості характеристики ПП звичайно задають допуск на загальний опір обмотки ПП. За точністю дотримання омичного опору ПП поділяють на три класи: широкого використання (похибка 5...15%), підвищеної точності (0,5...1%), високоточні (менш 0,1%).

5. Стабільність. Це є характеристика ПП, яка протягом всього терміну служби не повинна істотно змінюватися. Звичайно допуск на стабільність (тобто зміну опору в часі) дорівнює допуску на загальний опір.

6. Опір ізоляції обмотки відносно корпусу. За нормальних умов опір ізоляції при напрузі 500 В має бути не менш як 100...1000 МОм.

7. Потужність розсіювання. Максимальна робоча потужність розсіювання залежить від допустимого нагріву обмотки потенціометра.

Номинальна потужність розсіювання ПП 0,1...10 Вт, а в окремих випадках 15...20 Вт.

8. Робочий обертаючий момент. Він потрібний для початку переміщення движка з будь-якої довільної точки на контактній доріжці ПП. Обертаючий момент невеликих дротяних ПП загального застосування звичайно дорівнює 5...36 мН·м, а багатообертових ПП – 7...45 мН·м. Його іноді називають моментом зрушення.

9. Частота обертання. Дротяні ПП безвідмовно працюють лише при частоті обертання до 100...150 об/хв. За вищої частоти обертання через удари щітки движка об витки дроту контакт частково або повністю порушується. Підвищуючи контактний тиск і чистоту поверхні контактної доріжки, можна збільшити частоту обертання.

10. Строк служби. Строк служби ПП залежить від властивостей матеріалу обмотувального дроту і струмознімаючого движка щітки, контактного тиску, умов експлуатації та інших факторів. Строк служби ПП широкого використання – десятки тисяч циклів (тобто подвійних переміщень движка від одного кінця до іншого); потенціометрів, що застосовуються у обчислювальних пристроях, – 100...500 тис. циклів; високоточних дротяних потенціометричних перетворювачів – до 10 млн. циклів.

3.4. Нові типи ПП

Прагнення подолати зазначені недоліки ПП, а також розширити коло задач, що розв'язуються за їх допомогою, дало поштовх до створення недротяних прецизійних потенціометрів з резистивними елементами на основі провідної пластмаси.

Однорідна за структурою резистивна плівка забезпечує високу розподільчу здатність, низький рівень динамічних шумів і можливість роботи при високих швидкостях переміщення струмознімача (до 1000 об/хв), а малі індуктивність і ємність створюють сприятливі умови для роботи недротяних потенціометрів на високих частотах.

Проте ці елементи мають нижчі точність і стабільність, а також великий температурний коефіцієнт опору і високий перехідний опір у точці контакту.

За підвищених вимог до зносостійкості ПП доцільно використовувати фотоелектричні потенціометричні датчики або магніторезистивні потенціометри, в яких відсутній рухомий струмознімач.

Фотопотенціометр за характером перетворення сигналу являє собою аналог потенціометричного вимірювального перетворювача. Він

має резистивний шар 3 і провідний шар 5, нанесені поряд на ізолюючій підкладці 4 і відокремлені один від одного напівпровідниковим шаром 6 (рис. 3.2).

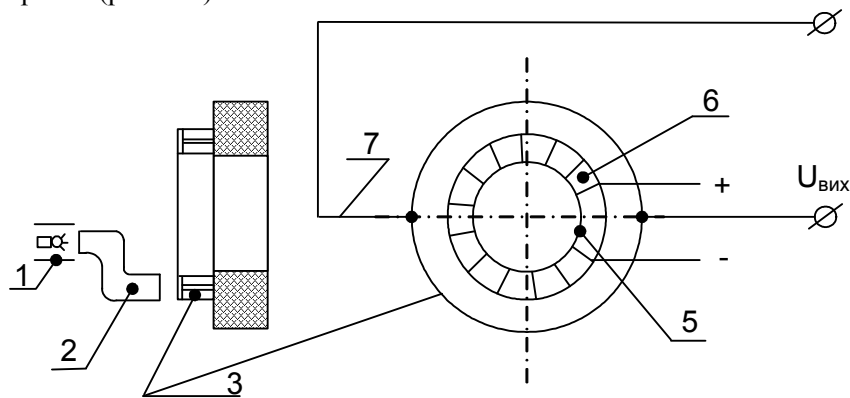


Рис. 3.2. Схематичне зображення конструкції фотопотенціометра

Під дією світлового потоку, що передається від джерела світла 1 по світловоду 2, на освітленій ділянці напівпровідникового відокремлювального шару утворюються фотоелектрони, у результаті чого ділянка резистивного шару, що відповідає положенню світловоду, електричне з'єднується з провідним шаром. При повороті світловоду вихідний сигнал фотопотенціометра змінюється. Реверсивність елемента досягається введенням середньої точки 7 резистивного шару. Як бачимо, відсутність рухомого третього контакту дає змогу досягти високої зносостійкості. Крім того, безконтактні потенціометри порівняно зі звичайними характеризуються нижчим рівнем шумів, що виникають у процесі регулювання, високою надійністю та швидкістю регулювання вихідного сигналу. Проте точність відтворення функціональної залежності, температурна стабільність і потужність розсіяння фотопотенціометра низькі.

Останнім часом ведуться розробки рідинних потенціометрів, для яких в якості резистивного елемента використовується рідина керметних потенціометрів. Резистивні елементи останніх виготовляють спіканням суміші скла з порошком окису паладію, срібла або золота з органічним пластифікатором. Також ведуться розробки потенціометрів, що базуються на нових фізичних принципах: ефекті Холла [38], МДН-структурах метал-діелектрик-напівпровідник, електрохімічних

явищах [74]. Проте жодний з цих видів потенціометрів не може повністю витіснити інший, оскільки кожний з них поряд з перевагами має також істотні недоліки, а тому найраціональніше може бути використаний лише в певних умовах.

3.5. Конструкції ПП

Відомі і застосовуються в основному такі види ПП:

– дротяні (обмоткові), які, у свою чергу, поділяються на одно- та багатообертові;

– плівкові, в яких робочий елемент – це шар напівпровідника або металевого сплаву (як правило, родію), нанесеного на ізоляційний каркас (здебільшого зі скла). Напруга з датчика знімається за допомогою металокерамічних щіток. Вона змінюється плавно, без стрибків; ці перетворювачі можуть бути виготовлені на будь-який опір;

– з рідинним (найчастіше ртутним) контактом.

За формою каркаса дротяні потенціометричні перетворювачі поділяються на такі види:

а) з прямокутним каркасом;

б) з фігурним каркасом (рис. 3.3). Крутість підняття каркаса dh/dx не повинна перевищувати 0,35. У противному разі може спостерігатися зсув обмотки;

в) із ступінчастим каркасом (рис. 3.4). Застосовується в тих випадках, коли не виконується умова $dh/dx \leq 0,35$.

Розрізняють такі основні способи зміни закону опору ПП: використання фігурного каркаса, використання електричного шунтування окремих ділянок обмотки, використання обмотки зі змінним кроком.

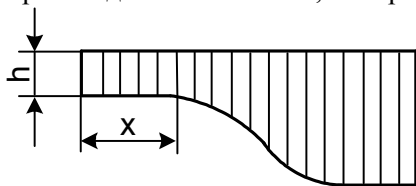


Рис. 3.3. Дротяний потенціометричний перетворювач з фігурним каркасом

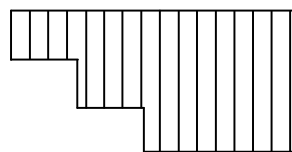


Рис. 3.4. Дротяний потенціометричний перетворювач з ступінчастим каркасом

В промисловості відомі два способи компоновки конструкцій ПП:

– потенціометричні перетворювачі, що використовуються в радіотехнічній апаратурі та обчислювальній техніці; виконуються як окре-

мий прилад з певною кількістю деталей, що вміщений в корпус із зовнішньою контактною групою;

– потенціометричні перетворювачі, що застосовуються в приладах точної механіки та в гіроскопічних приладах. Вони складаються з двох основних конструктивних елементів – резистора (каркас з обмоткою) і рухомої контактної групи (двигок або щітка). Резистор і двигок монтується у різних блоках і стикаються лише при загальному складанні самого виробу. Спільні елементи в обох групах – резистор і двигок. Саме від них залежать надійність, точність відтворення функції та вся робота ПП.

За способом переміщення движка ПП поділяють на такі типи:

- з прямолінійним переміщенням движка;
- кільцеві з обмежено-круговим переміщенням движка;
- кільцеві з необмежено-круговим переміщенням движка;
- плоскі з необмежено-круговим переміщенням движка;
- багатообертові.

ПП з прямолінійним переміщенням движка – це пристрій, обмотка резистора якого розміщена на каркасі з поздовжньою віссю у вигляді прямої лінії (рис. 3.5).

Рухомий контакт 3 (щітка) движка 2 такого ПП переміщується по контактній доріжці резистора 1 (очищеній від ізоляції обмотки на каркасі). Другий рухомий контакт 4 ковзає по нерухомому струмоznімаючому контакту 5.

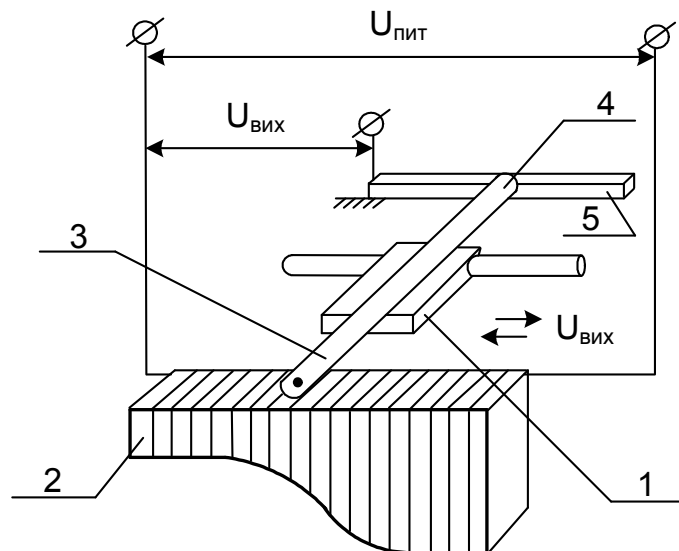


Рис. 3.5. Потенціометричний перетворювач з лінійним переміщенням движка

Надати движку точно заданого прямолінійного переміщення конструктивно і технологічно складніше, ніж надати високоточного кругового переміщення движку в кільцевих потенціометрах. Тому ПП з прямолінійним переміщенням движка використовуються головним чином у випадках, коли вихідний елемент пристрою, сполученого з ПП, також переміщується прямолінійно.

Кільцеві ПП з обмежено-круговим переміщенням движка за конструкцією принципово не відрізняються від ПП з прямолінійним переміщенням движка.

Каркас резистора 4 (рис. 3.6) – прямокутного перерізу з листового матеріалу, зігнутий у вигляді кільця. Рухомий контакт 3 (щітка) движка 2 ковзає по контактній доріжці резистора в межах утвореного упорами кута. За допомогою другого рухомого контакту 1 і нерухомого струмознімаючого кільця 5, як і у ПП з прямолінійним переміщенням движка, відбувається знімання вихідної напруги.

ПП кільцеві з необмежено-круговим переміщенням движка відрізняються від кільцевих ПП з обмежено-круговим переміщенням движка тим, що їх конструкція передбачає необмежене переміщення

движка в будь-який бік. Резистор таких ПП виконано у вигляді суцільного кільця.

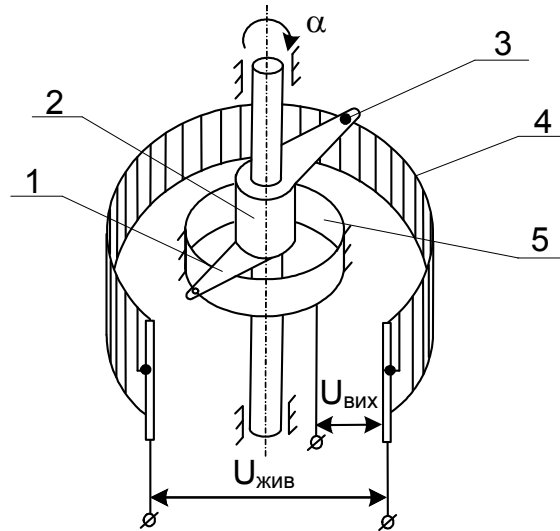


Рис. 3.6. Потенціометричний перетворювач з круговим переміщенням движка

ПП плоскі з необмежено-круговим переміщенням движка – це ПП, вихідна напруга яких змінюється за синусоїдою. Обмотка 2 такого ПП (рис. 3.7) намотується на каркас 1 у вигляді плоского квадратного листа ізоляційного матеріалу. Вісь движка 3 проходить через центр каркаса і під час її обертання рухомий контакт переміщується по колу. Вихідна напруга знімається з движка та середньої точки обмотки.

З високоточних потенціометрів найпоширеніші однообертові пластинчасті і особливо кільцеві ПП. Вони характеризуються підвищеною точністю завдяки поліпшеній технології виготовлення деталей, використанню коригувальних пристроїв, намотуванню резисторів на спеціальних верстатах з автоматичним коригуванням за лінійністю.

Однообертові потенціометри виконуються або як одинарні, або у вигляді блоків з одинарних потенціометрів у будь-якому їх поєднанні (подвоєні, потроєні, зчетверені).

Багатообертові потенціометричні перетворювачі (БПП). В зв'язку з підвищенням вимог до потенціометрів останніми роками були

створені багатообертові потенціометри, які характеризуються більшою розподільчою здатністю.

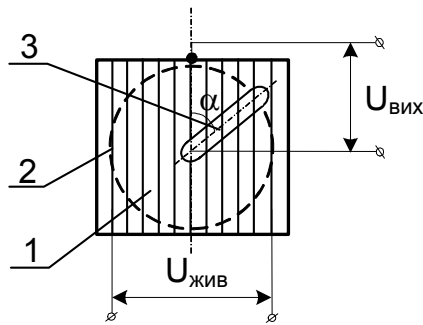


Рис. 3.7. Плоский ПП з необмежено-круговим переміщенням движка

Каркасом резистора (рис. 3.8) у таких ПП є мідний провід 6 діаметром 1...2 мм, закручений у спіраль з 3, 5, 10, 15, 20, 25, або 40 витками. Каркас електричне ізолюваний.

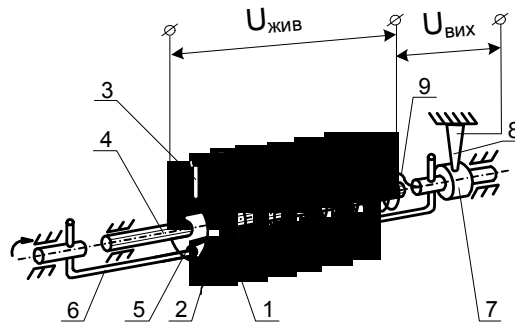


Рис. 3.8. Багатообертовий потенціометричний перетворювач

Обмотку резистора виконують голим (неізолюваним) дротом 5. Потрібний закон змінювання опору забезпечується завдяки змінному кроку намотування.

Конструкція БПП ускладнюється тим, що движку потрібно дати можливість не лише обертатися, але й одночасно поступально переміщуватися вздовж осі БПП.

Очевидно, що за один оберт щітка 3 БПП має переміщуватися вздовж осі на величину, що дорівнює кроку спірального каркаса резистора. Такий складний рух виконується за допомогою нерухокої гвинтової направляючої 4, веденої гайки 5 і повідка 6. Вихідна напруга знімається з потенціометра за допомогою пари рухомого 7 та нерухомого 8 струмознімаючих контактів. Пружина 9 виготовлена з матеріалу, який добре проводить струм, і забезпечує надійне електричне з'єднання щітки 3 та контакту 8.

Основні переваги БПП:

– невеликі габаритні розміри при високій розподільчій здатності завдяки великому числу витків резистора;

– використання неізолюваного дроту дає змогу контролювати опір безпосередньо в процесі намотування, а відмова від профільованого каркаса – автоматично коригувати опір, змінюючи крок намотування.

Точність БПП досягає сотих часток процента. Величина їх похибки обернено пропорційна до числа витків; момент обертання складає 20...50 мН·м і він більший, ніж у однооберткових потенціометрів.

Недолік БПП – обмежена область використання, оскільки їх можна застосовувати лише в пристроях, де потрібна мала швидкість і допускається великий момент обертання. Якщо для введення аргументу на однооберткових ПП потрібна частота обертання складає 1 об/с, то щоб задати те саме значення 10-обертковому перетворювачу, знадобиться частота обертання 10 об/с, що не завжди можливо.

Поява БПП дала змогу значно підвищити точність і надійність роботи потенціометричних схем, але це не означає, що БПП повністю можуть замінити однооберткові ПП.

3.6. Схеми ввімкнення ПП

Найширше застосовуються схеми ввімкнення кільцевих ПП, зображені на рис. 3.9, а – г. Вони мають лінійну залежність приросту опору від переміщення за всім ходом щітки, тобто є лінійними (схема на рис. 3.9, г нелінійна в статичному режимі).

Схема на рис. 3.9, а називається схемою з виведенням середньої точки. Вона має деякі недоліки:

– на навантаженні падає напруга, яка знімається з середньої точки і з щітки;

– виведення середньої точки вносить додаткові технологічні труднощі під час виготовлення ПП.

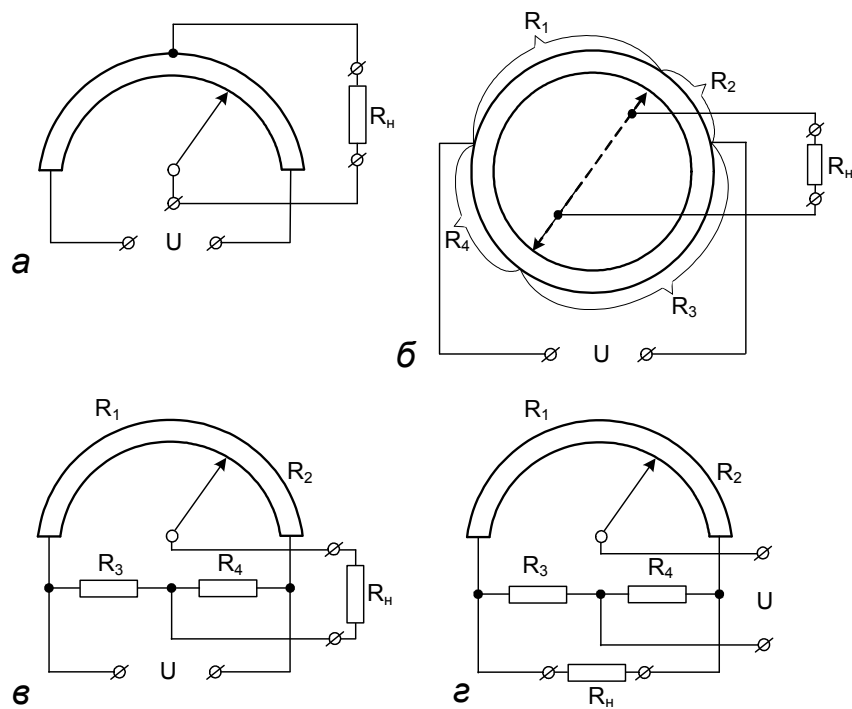


Рис. 3.9. Схеми вмикання кільцевих ПП: а – з виведенням середньої точки; б – кільцева мостова схема; в – з штучною середньою точкою; г – обернена з штучною середньою точкою

Схему, показану на рис. 3.9, б, називають кільцевою мостовою схемою з чотирма змінними плечами.

Переваги цієї схеми:

- має чутливість удвічі вищу, ніж попередня схема;
- кут повороту (360°) більший, ніж у попередньої схеми.

Щоб уникнути перелічених недоліків схеми з виведенням середньої точки, використовують схему з штучною середньою точкою (рис. 3.9, в), яка не потребує реального струмовідведення від середньої точки ПП.

Зображена на рис. 3.9, г схема називається оберненою схемою зі штучною середньою точкою. Вона відрізняється від схеми, показаній

на рис. 3.9, в, лише взаємною заміною місць подання до схеми живлення та вмикання навантаження.

Подібним чином виглядають схеми ввімкнення ПП з поступальним переміщенням повзунка.

Існує багато різновидів інших схем ввімкнення ПП.

3.7. Рівняння статичної характеристики ПП

Динамічні характеристики навантаженого ПП будуть відрізнятися від статичних характеристик за умови значних швидкостей переміщень движка лише в разі реактивного характеру опору навантаження, оскільки власний опір ПП чисто активний навіть на підвищених частотах.

Статичні характеристики ПП, які ввімкнені за схемами 3.9, а – в і працюють в умовах холостого ходу, являють собою лінійні залежності. Це визначається тим, що в даному разі ПП працює як ідеальний подільник напруги. Відступ від лінійної залежності зумовлений лише ступінчастістю характеристики для дротяних ПП та похибкою виготовлення.

Статична характеристика ПП, ввімкненого за схемою 3.9, г, нелінійна і в умовах холостого ходу.

В умовах, відмінних від режиму холостого ходу, характеристики ПП не є строго лінійними незалежно від схеми увімкнення, що пояснюється зміною значення вихідного опору схеми ПП залежно від положення движка.

Виведемо рівняння статичної характеристики навантаженого ПП, ввімкненого за схемою рис. 3.10, де ΔR – опір ділянки обмотки ПП між середньою точкою та щіткою; R – загальний опір ПП; R_n – опір навантаження; U – напруга живлення; U_n – вихідна напруга.

Щоб отримати статичну характеристику, потрібно знайти залежність напруги на навантаженні U_n від приросту опору ΔR (або величини лінійного x чи кутового α переміщення движка) і параметрів схеми R, R_n .

Скористаємося теоремою про еквівалентний генератор, згідно з якою лінійне електричне коло довільної складності для визначення струму в будь-якій з його віток можна замінити еквівалентним колом.

У даному разі напруга еквівалентного генератора дорівнює:

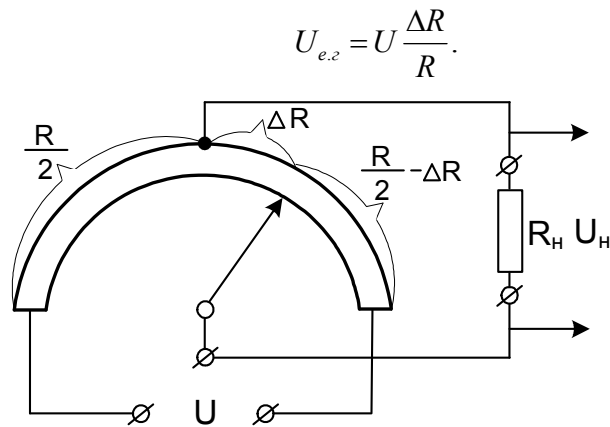


Рис. 3.10. До виведення рівняння статичної характеристики

Внутрішній опір еквівалентного генератора, відповідно до схеми, дорівнює:

$$R_{e.g} = \frac{\Delta R(R - \Delta R)}{R},$$

де $R_{e.g}$ – опір еквівалентного генератора.

В даному випадку внутрішній опір джерела живлення схеми не враховується (в разі потреби його неважко врахувати).

Сила струму в опорі навантаження:

$$I_n = \frac{U_{e.z}}{R_{e.g} + R_n} = \frac{U \frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta R(R - \Delta R)}{R} + R_n}.$$

Напруга на опорі навантаження:

$$U_n = I_n R_n = \frac{U \frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right)}$$

або

$$U_n = U \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) \frac{R}{R_n}}$$

У здобутому виразі, який є рівнянням статичної характеристики ПП, перший множник являє собою рівняння характеристики ідеального подільника напруги, що відповідає холостому ходу ПП. Другий множник характеризує вплив опору навантаження на характеристику ПП і стає одиницею при $R_n \rightarrow \infty$, а практично при $R/R_n \ll 1$.

Введемо такі позначення: x – вхідне переміщення ПП; l – загальна довжина обмотки ПП.

Оскільки для ПП з лінійним розподілом опору з точністю до сталого коефіцієнта k виконуються рівняння $x=k\Delta R$, $l=kR$, то вираз статичної характеристики можна переписати у вигляді:

$$U_n = \frac{x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{R}{R_n}}$$

Аналогічно розглянутій схемі (див. рис. 3.10) можна скласти рівняння статичних характеристик для решти схем ввімкнення ПП.

Рівняння статичної характеристики ПП, ввімкненого за схемою, показаною на рис. 3.9, б, матиме вигляд:

$$U_n = \frac{2x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right)}$$

за схемою на рис. 3.9, в:

$$U_n = \frac{x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} - \frac{x^2}{l^2}\right)};$$

за схемою на рис. 3.9, г:

$$U_n = \frac{2x}{l} U \frac{1}{1 + \frac{R}{4R_3} + \frac{R_3}{R} + \frac{\Delta R^2}{RR_3} + \frac{R}{R_n} \left(1 + \frac{R_3}{R} - \frac{2\Delta R^2}{R^2}\right)}$$

Останнє рівняння при $R_n \rightarrow \infty$ матиме нелінійний характер.

3.8. Похибки через нелінійність статичної характеристики ПП

Абсолютна похибка, зумовлена нелінійністю характеристики навантаженого ПП, порівняно з характеристикою перетворювача в режимі холостого ходу виражається формулою:

$$\Delta U_n = U_{nx} - U_n = \frac{x}{l} U \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{R}{R_n}} \right].$$

Відносна похибка нелінійності

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{R}{R_n}}.$$

Як видно з формули, відносна похибка нелінійності дорівнюватиме нулю при $x/l=0$ і при $x/l=1$. Умова $x/l=1$ не може бути виконана, оскільки для даного ПП $x_{\max} \leq l/2$.

Неважко відшукати і максимальну відносну похибку нелінійності. Вона відповідатиме випадку $x=0,5l$ або $\varphi_{\max} = 0,5\varphi_{об}$ (граничному відхиленню движка) і становитиме

$$\left. \frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \right|_{\max} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{R}{R_n}}.$$

Для прикладу визначимо, яким має бути відношення R/R_n , щоб максимальне значення відносної похибки не перевищувало 1%. З останнього виразу маємо

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{R}{R_n}} \ll 0,01.$$

Розв'язавши цю нерівність, дістанемо $R/R_n \ll 4/99$, тобто опір ПП для даної схеми ввімкнення має становити трохи більше як 4% опору навантаження, щоб максимальне значення відносної похибки нелінійності не перевищувало 1%.

Вирази відносної похибки і відповідні їм максимальні та мінімальні значення можна отримати і для інших схем.

Так, для схеми на рис. 3.9, б:

$$\Delta U_n = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2} \right)};$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\max \text{ при } x=0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{2R_n}};$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\min \text{ при } x=0,5, l=0}.$$

Для схеми на рис. 3.9, в:

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} - \frac{x^2}{l^2} \right)};$$

$$\frac{\Delta U_n}{U_{nx}} \Big|_{\max \text{ при } x=0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{R}{R_n} \left(\frac{1}{4} + \frac{R_3}{2R} \right)}.$$

Для схеми, зображеної на рис. 3.9, г, існують більш складні вирази.

3.9. Методи зменшення похибок нелінійності навантажених ПП

Усунути або зменшити похибки нелінійності ПП можна за допомогою таких методів:

1) Використати навантаження з досить великим опором порівняно з опором ПП. В разі роботи ПП на змінному струмі можна використовувати розв'язувальний трансформатор або катодний емітерний повторювач.

2) Раціонально вибрати схему ввімкнення.

3) Звужувати діапазон змінювання $\Delta R/R$ або x/l . При цьому не слід значно збільшувати довжину обмотки потенціометра за межі його робочого кута. Значення $\Delta R/R$ простіше знизити ввімкненням послідовно з ПП сталих опорів.

4) Оптимально добирати значення крутості характеристики ПП.

5) Застосовувати функціональні ПП з нелінійним розподілом опору вздовж каркаса.

6) Використовувати ексцентричне розміщення осі движка відносно осі каркаса. Цей метод можливий лише для порівняно невеликих кутових переміщень движка. На практиці він незручний і поширення не набув.

Суть четвертого методу полягає в тому, що за номінальне значення крутості характеристики береться не те її значення, яке відповідає характеристиці ідеального подільника, а деяке інше значення, при якому похибка нелінійності має в межах робочої ділянки різні знаки. Абсолютні значення похибок при цьому значно знижуються. Найвигідніше з точки зору мінімуму похибок нелінійності номінальне значення крутості характеристики легко вибрати графічно.

Метод можна пояснити графіком, зображеним на рис. 3.11, де 1 – нелінійна характеристика навантаженого ПП, яка відповідає схемі рис. 3.9, а; 2 – характеристика ідеального подільника напруги; 3 – деяка пряма, крутість якої взято за номінальне значення характеристики ПП. Як видно з рис. 3.11, крутість характеристики ПП є змінною через нелінійність характеристики. За цих умов номінальне (паспортне) значення крутості характеристики відповідає крутості деякої спрямленої характеристики, яка замінює реальну нелінійну характеристику.

Різниця між спрямленою та реальною характеристиками і становить похибку нелінійності. Як впливає з рис. 3.11, за номінальне значення крутості характеристики найкраще (з точки зору зменшення похибки) брати не крутість характеристики холостого ходу (пряма 2), а крутість деякої іншої прямої (пряма 3). При цьому похибка нелінійності, яка визначатиметься різницею ординат прямої 3 і характеристики ПП (показана штриховкою), зменшується. Величину нахилу прямої 3 неважко підібрати для будь-якого відомого опору навантаження безпосередньо за графіком, виходячи з мінімуму похибки нелінійності або з бажаного характеру зміни цієї похибки. Ту саму задачу можна розв'язати і аналітичне з меншою наочністю, але з більшою точністю.

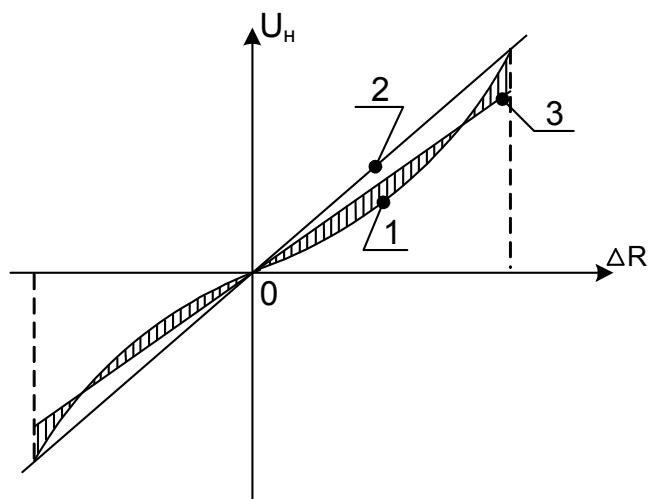


Рис. 3.11. Графіки змінювання статичної характеристики ПП

3.10. Розрахунок лінійних ПП

Лінійним ПП називається перетворювач з лінійним розподілом опору вздовж каркаса потенціометра, тобто такий, що має лінійну статичну характеристику в режимі холостого ходу.

Розглянемо схему, зображену на рис. 3.12.

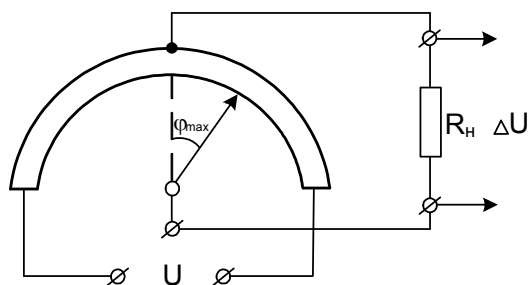


Рис. 3.12. Схема ПП для його розрахунку

Нехай задано вихідні параметри для розрахунку: напругу живлення U і максимальний кут повороту движка (щітки) φ_{\max} .

Кут обмотки ПП $\varphi_{\text{об}}$ має задовольняти співвідношенню $\varphi_{\text{об}} > 2\varphi_{\max}$. Для ПП з лінійним переміщенням движка $l > 2x$.

Чутливість ПП з кутовим переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{u}{\varphi_{об}}$.

Для ПП з лінійним переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta l} = \frac{u}{l}$, звідки можна отримати значення крутості характеристики ПП. Опір обмотки ПП

$$R = \frac{\rho l_{\omega} \omega}{q 10^3},$$

де ρ – питомий опір проводу обмотки. Ом·мм²/м; l_{ω} – середня довжина одного витка, мм; ω – число витків обмотки на каркасі; q – площа поперечного перерізу проводу обмотки, мм².

Враховуючи, що число витків обмотки

$$\omega = \frac{l}{d_{і3}},$$

де l – довжина обмотки на каркасі по дузі каркаса або по робочій доріжці, мм (рис. 3.13); $d_{і3}$ – діаметр обмотувального проводу з ізоляцією, мм, дістаємо формулу для визначення опору обмотки у вигляді:

$$R = \frac{\rho l_{\omega} l}{q d_{і3} 10^3}.$$

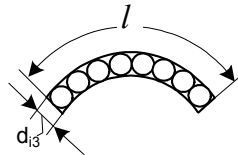


Рис. 3.13. Довжина обмотки на каркасі ПП

Довжину обмотки на каркасі по дузі каркаса або по робочій доріжці можна знайти з пропорції

$$\frac{2\pi r - 360^\circ}{l - \varphi_{об}},$$

де r – радіус кривини каркаса або робочий радіус движка, мм,

$$l = \frac{2\pi r \varphi_{об}}{360^\circ}$$

Тоді вираз для опору обмотки ПП запишемо у вигляді

$$R = \frac{2\pi r \varphi_{об} \rho l_{\omega}}{360^{\circ} q d_{із} 10^3}$$

Для каркаса ПП прямокутного перерізу (рис. 3.14) середня довжина одного витка

$$l = 2(h + b) + \pi d_{із},$$

де h – висота каркаса; b – товщина каркаса.

Для струму U/R , який проходить через ПП, необхідно виконати співвідношення $(U/R) \ll I_{доп}$, де $I_{доп}$ – максимально допустимий струм з точки зору нагрівання обмотки; $I_{доп} = q\delta$, де δ – густина струму, А/мм².

$$\text{Тоді } \frac{U}{R} \leq q\delta \text{ або } \frac{U}{q\delta} \leq R.$$

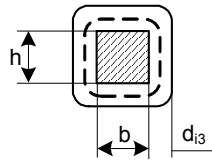


Рис. 3.14. Середня довжина одного витка

Враховуючи вираз для розрахунку опору, маємо:

$$\frac{U}{\delta} \leq \frac{2\pi r \varphi_{об} \rho l_{\omega}}{360^{\circ} d_{із} 10^3}$$

Здобутий вираз є основним розрахунковим співвідношенням для ПП.

Матеріал проводу, а, отже, і ρ , вибирають згідно з призначенням і загальними умовами роботи ПП.

Допустиму густину струму δ вибирають залежно від матеріалу каркасу, умов теплообміну. На практиці густина струму $\delta = 5 \dots 30$ А/мм². За умови відомого перерізу обмотувального дроту допустима густина струму визначається силою допустимого струму.

В свою чергу допустимий струм можна знайти з умови забезпечення правильного теплообміну (виключення перегріву ПП):

$$\frac{I_{доп}^2 R}{\mu S} \leq t_{\max nn} - t_{\max uc}$$

де μ – коефіцієнт тепловіддачі (звичайно перебуває в межах $0,12 \dots 0,14 \text{ Вт}/(\text{дм}^3 \cdot ^\circ\text{C})$); S – площа поверхні охолодження ПП, дм^2 ; t_{max}^m – максимально допустима температура для даної конструкції ПП; $t_{\text{max}}^{\text{nc}}$ – максимальна температура навколишнього середовища.

З метою зменшення моменту зворотної дії радіус розточки каркаса (або робочу довжину движка) r по змозі слід вибирати малим.

Момент зворотної дії визначається моментом сил сухого тертя:

$$M_{\text{тер}} = Pfr,$$

де P – сила натягу щітки ПП (величина P коливається від десятих часток грама до декількох грамів); f – коефіцієнт сил сухого тертя при русі щітки по обмотці (орієнтовно $f = 0,2 \dots 0,4$).

Якщо в якості вихідних будуть задані інші параметри, послідовність розрахунку потрібно змінити.

Як приклад виконаємо розрахунок ПП для сигналізації зміни тиску на $0,1$ ат від нормального, що дорівнює 2 ат.

Принципову схему сигналізатора зображено на рис. 3.15. Мембрана використовується як чутливий елемент і дає переміщення движка $\Delta l = 1$ мм при зміні тиску на $0,1$ ат. ПП працює на поляризоване реле з напругою спрацьовування $\Delta U = 0,5$ В. Напруга живлення ПП дорівнює 26 В. Каркас ПП квадратного перерізу ($h = b$). Опір реле $R_{\text{н}} = 5000$ Ом.

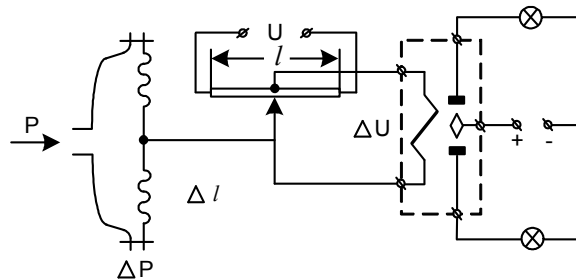


Рис. 3.15. Потенціометричний перетворювач для сигналізації зміни тиску

Оскільки опір реле досить великий і в нормальному стані движок потенціометра перебуває в нульовому положенні, то в розрахунок замість ΔU можна підставити безпосередньо напругу спрацьовування реле.

Послідовність розрахунку

1. Вибираємо як обмотувальний провід константан марки Е-2Н16 з такими характеристиками: $d_{із}=0,28$ мм, $q=0,0491$ мм², $\rho=0,49$ Ом·мм²/м, $\delta=3$ А/мм².

2. Загальну довжину обмотки на каркасі по дузі каркаса ПП визначаємо з співвідношення:

$$\frac{U}{l} = \frac{\Delta U}{\Delta l},$$

Тобто

$$l = U \frac{\Delta l}{\Delta U} = 26 \frac{1}{0,5} = 52 \text{ мм.}$$

3. Загальне число витків

$$\omega = \frac{l}{d_{із}} = \frac{52}{0,28} = 185.$$

4. Загальний опір

$$\omega = \frac{l}{d_{із}} = \frac{26}{0,0491 \cdot 3} = 176,4 \text{ Ом.}$$

5. Середня довжина одного витка може бути знайдена з співвідношення

$$R = \frac{\rho l_{\omega} \omega}{q 10^3}.$$

Тоді

$$l_{\omega} = \frac{R q 10^3}{\rho \omega} = \frac{176,4 \cdot 0,0491 \cdot 10^3}{0,49 \cdot 185} = 93,5 \text{ мм.}$$

6. Знаючи довжину одного витка l_{ω} , потрібні габаритні розміри квадратного перерізу ПП легко визначити з формули

$$l_{\omega} = 2(h + b) + \pi d_{із},$$

$$b = h = 23,1 \text{ мм.}$$

Для прямокутного перерізу каркаса, задавшись однією з величин (наприклад, товщиною b каркаса), визначимо інший розмір каркаса h .

7. Перевіримо відносну похибку ξ в напрузі, яка знімається з движка ПП при переміщенні його на 1 мм:

$$\xi = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{l} \left(1 - \frac{\Delta x}{l}\right) \frac{R}{R_n}} = 0,00066 = 0,066\%.$$

Це цілком допустимо, тим більше, що практично зміна напруги завжди відбувається стрибками при переміщенні движка з витка на виток.

3.11. Функціональні ПП

Функціональні ПП – це перетворювачі з нелінійним розподілом опору вздовж каркаса, тобто із змінним співвідношенням $\Delta R/\Delta x$ або $\Delta R/\Delta \varphi$. Такі ПП використовуються для компенсації власної нелінійності навантаженого ПП або нелінійності одного чи декількох елементів схеми приладу (або системи), увімкнених до чи після ПП.

Застосовуються такі методи отримання нелінійного розподілу опору по довжині потенціометра:

- 1) намотка проводу потенціометра змінним кроком;
- 2) використання обмотувального проводу з різними діаметрами або з різними питомими опорами;
- 3) створення змінної довжини витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркаса (зміна плавна або ступінчаста);
- 4) шунтування ділянок потенціометра з лінійним розподілом опору сталими опорами.

Два останніх методи найпростіші і тому застосовуються частіше за інші.

Іноді, щоб дістати нелінійну залежність, використовують спеціальні кінематичні ланки.

Виконаємо розрахунок функціонального потенціометра із змінною довжиною витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркаса (так званого профільного ПП).

Профільний потенціометр (рис. 3.16) у звичайному виконанні – це плоска ізоляційна пластинка (каркас) невеликої товщини, з одного боку прямолінійна, а з другого – вирізана по деякій кривій. На таку пластинку щільно (виток до витка) намотується дріт. До кінців ПП підводиться напруга живлення U , а з його движка знімається напруга $U_{\text{вих}} = f(x)$, функціонально залежна від переміщення x движка.

Вид залежності $U_{\text{вих}}$ від x визначається формою вирізу каркаса потенціометра, тобто залежністю його висоти h від переміщення x движка $h = \varphi(x)$.

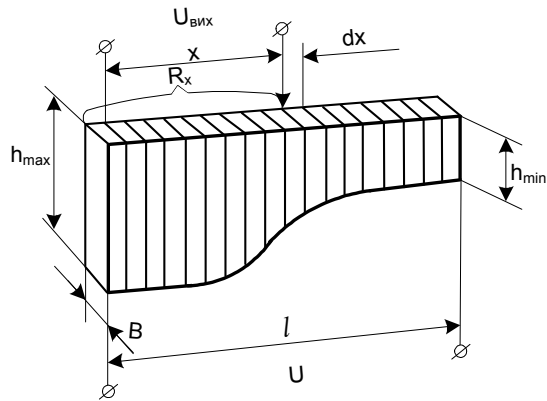


Рис. 3.16. Профільний потенціометр

Знайдемо залежність $h=\varphi(x)$, необхідну для того, щоб дістати потрібну форму рівняння $U_{вих}=f(x)$. Вважатимемо, що намотування дроту на каркасі рівномірне і ПП працює на великий опір навантаження.

Перемістимо движок потенціометра із деякого довільного положення x на невелику ділянку dx . Тоді приріст dR_x опору R_x можна записати у вигляді

$$dR_x = \rho \frac{\omega}{l} dx l \omega$$

або, без урахування довжини витка на заокругленнях,

$$dR_x = \frac{\rho \omega}{l q} dx 2(h+b).$$

Величина ω/l дає числове значення кількості витків на одиницю довжини потенціометра.

При цьому приріст напруги на вихідних клеммах

$$dU_{вих} = I dR_x = \frac{U}{R} dR_x = \frac{2U\rho\omega}{lqR} (h+b)dx.$$

Звідси висота каркаса

$$k = \frac{lqR}{2U\rho\omega}, \quad h = k \frac{dU_{вих}}{dx} - b,$$

де h – стала величина, не залежна від x .

Отже, потрібну форму каркаса потенціометра можна визначити, якщо продиференціювати по x задану залежність вихідної напруги від переміщення движка ПП.

Нехай, наприклад, потрібно дістати залежність $U_{\text{вих}}=cx$ (рис. 3.17).

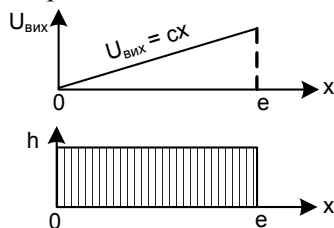


Рис. 3.17. Зміна висоти каркаса ПП з лінійною залежністю

Згідно з наведеною формулою висота каркаса

$$h = k \frac{d(cx)}{dx} - b = kc - b$$

має бути сталою.

Якщо потрібно знайти залежність $U_{\text{вих}}=cx^2$ (рис. 3.18), то висота каркаса має змінюватися залежно від x за законом

$$h = k \frac{d(cx)^2}{dx} - b = 2kcx - b,$$

тобто лінійно залежати від переміщення x .

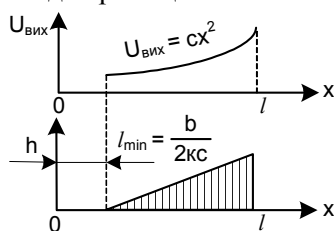


Рис. 3.18. Зміна висоти каркаса ПП з квадратичною залежністю

У цьому разі потрібний вигляд залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ за рахунок кінцевої товщини b каркаса можна дістати лише від деякого початкового значення x , що не дорівнює нулю при $l_{\text{min}}=b/2kc$. Якщо l_{min} вважати за

початкову точку ПП, то $U_{\text{вих}}=f(x)$ починатиметься не з нульового значення.

Як інший приклад розглянемо випадок, коли переміщення движка x пропорційне квадрату вимірюваної величини (рис. 3.19) $x=ay^2$, а вихідна напруга має залежати від вимірюваної величини лінійно, тобто $U_{\text{вих}}=my$. Заданою залежністю в цьому разі буде

$$U_{\text{вих}} = \frac{m}{\sqrt{a}} \sqrt{x} = c\sqrt{x},$$

а шукану залежність $h=\varphi(x)$ дістанемо у вигляді

$$h = kc \frac{d(\sqrt{x})}{dx} - b = \frac{kc}{2} \frac{1}{\sqrt{x}} - b.$$

Оскільки при $x=0$ висота каркаса прямує до нескінченності, то потрібну залежність вихідної напруги також можна знайти лише від якогось початкового значення x , що не дорівнює нулю, при $l=l_{\text{min}}$.

У ряді випадків виконання потенціометра з плавно профільованим каркасом пов'язане із значними труднощами його виготовлення та намотування проводу. Тоді користуються таким прийомом. Криву потрібної залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ розбивають так, як показано на рис. 3.20, а на ряд ділянок і утворені при цьому точки (0, 1, 2, 3,...) сполучають прямими лініями. Кількість ділянок визначається допустимою похибкою при реалізації залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ і має бути тим більшою, чим менша допустима похибка.

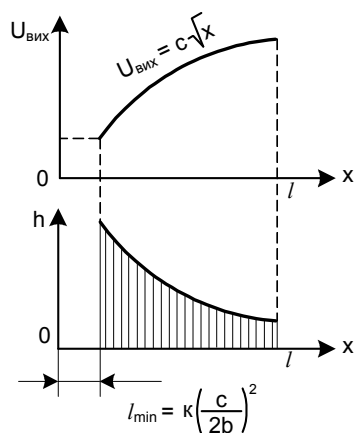


Рис. 3.19. Потенціометр з переміщенням движка, пропорційним до квадрата вимірюваної величини

Здбута таким чином ламана характеристика наближено замінює точну безперервну характеристику і може бути реалізована значно простіше за допомогою розбиття всього потенціометра на ряд ділянок з сталою висотою каркаса на кожній ділянці (рис. 3.20, б).

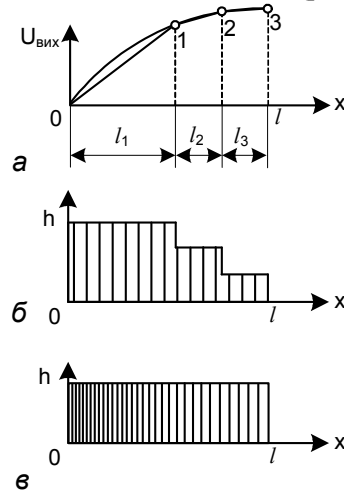


Рис. 3.20. Способи побудови функціональної залежності ПП:
 а – характеристика ПП; б – ПП з ступінчастим каркасом;
 в – ПП із змінним кроком намотки

Потрібно лише, щоб характеристика кожної ділянки потенціометра мала нахил, який точно дорівнює відповідному нахилу відрізка ламаної 0–1–2–3–... .

На рис. 3.20, в показано спосіб побудови аналогічної ламаної характеристики застосуванням на різних ділянках каркаса різних відстаней між витками (кроку намотування). Той самий результат дістанемо, якщо виконуватимемо намотування різних ділянок потенціометра проводами різних діаметрів або з різних матеріалів з неоднаковими ρ .

Метод розрахунку функціонального ПП з шунтуючими опорами розглянемо на конкретному прикладі потенціометра, вихідна напруга якого пропорційна до синуса кута переміщення движка (рис. 3.21).

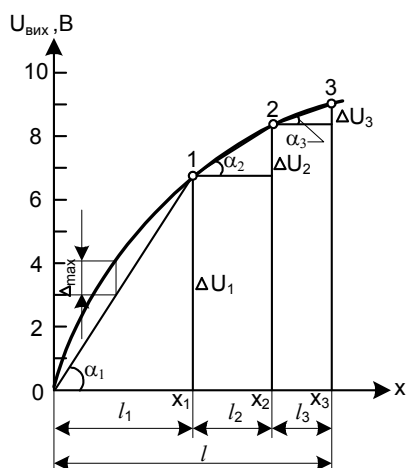


Рис. 3.21. Синусоїдна характеристика функціонального ПП

Нехай потрібно розрахувати шунтуючі опори до потенціометра довжиною $l=100$ мм і опором 100 Ом, якщо необхідна залежність вихідної напруги від переміщення движка

$$U_{\text{вих}} = U \sin \alpha,$$

де

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2; \quad \alpha = \frac{x_{1,2,3}}{l} \pi/2.$$

Напруга живлення $U=10$ В. Максимально допустима похибка Δ_{max} вихідної напруги не повинна перевищувати $3\% U$, тобто має бути меншою за $0,3$ В.

Необхідна залежність $U_{\text{вих}}=U \cdot \sin \alpha$ може бути здійснена за допомогою профільного потенціометра (рис. 3.22), висота каркаса якого змінюється за законом

$$h = k \frac{dU_{\text{вих}}}{dx} - b = kU \cos \alpha - b.$$

Для розрахунку шунтуючих опорів будуємо криву $U_{\text{вих}}=U \cdot \sin \alpha$, показану на рис. 3.21, і розбиваємо її на три ділянки: 0-1, 1-2, 2-3. При розбитті максимальна похибка

$$\Delta = (U_{\text{вих}})_{\text{точн.}} - (U_{\text{вих}})_{\text{набл.}}$$

ніде не перевищує $0,3$ В, тобто вкладається у задані межі.

При цьому довжини окремих ділянок потенціометрів становлять $l_1=50$ мм, $l_2=30$ мм, $l_3=20$ мм, а опори відповідних ділянок $R_1=50$ Ом, $R_2=30$ Ом, $R_3=20$ Ом, оскільки намотка потенціометра рівномірна.

$$R_{II} = \frac{R'_2 R}{R'_2 + R_2}; \quad R_{III} = \frac{R'_3 R_3}{R'_3 + R_3},$$

Звідки

$$R'_2 = \frac{R_2 R_{II}}{R_2 - R_{II}}; \quad R'_3 = \frac{R_3 R_{III}}{R_3 + R_{III}}.$$

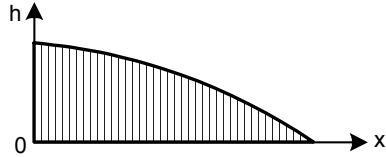


Рис. 3.22. Побудова синусоїдної залежності за рахунок використання каркаса із змінною за косинусоїдою висотою

Необхідний приріст напруги на кожній ділянці (див. рис. 3.21)

$$\Delta U_I = U \sin \alpha_1 = 7\text{В},$$

$$\Delta U_{II} = U \sin \alpha_2 - \Delta U_I = 2,5\text{В},$$

$$\Delta U_{III} = U - \Delta U_I - \Delta U_{II} = 0,5\text{В}.$$

Оскільки струм на всіх ділянках потенціометра має бути однако-вим, можна скласти рівняння

$$I = \frac{\Delta U_I}{R_I} = \frac{\Delta U_{II}}{R_{II}} = \frac{\Delta U_{III}}{R_{III}},$$

звідки, зрівнявши окремо два перші та окремо два другі дроби, діста-немо

$$R_{II} = R_I \frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_I} = 50 \frac{2,5}{7} = 17,85 \text{ Ом},$$

$$R_{III} = R_{II} \frac{\Delta U_{III}}{\Delta U_{II}} = 17,85 \frac{0,5}{2,5} = 3,57 \text{ Ом}.$$

Знаючи повні опори окремих ділянок потенціометра, знаходимо значення потрібних шунтуючих опорів:

$$R'_2 = \frac{30 \cdot 17,85}{30 - 17,85} = 44,1 \text{ Ом},$$

$$R'_3 = \frac{20 \cdot 3,57}{20 - 3,57} = 4,35 \text{ Ом}.$$

Перевіримо правильність виконаного розрахунку для однієї з ділянок потенціометра, наприклад, першої. Приріст напруги на цій ділянці

$$\Delta U_1 = I_1 R_1 = \frac{U R_1}{R_1 + R_{II} + R_{III}} = \frac{10 \cdot 50}{50 + 17,85 + 3,57} = 7 \text{ В}.$$

Здобутий приріст вихідної напруги на першій ділянці дорівнює заданому, що підтверджує правильність розрахунку. Аналогічно можна перевірити розрахунок і для інших ділянок ПП.

У розглянутому ПП з шунтуючими опорами (рис. 3.23) синусоїдна залежність обмежена інтервалом від $\sin \alpha = 0$ до $\sin \alpha = 1$, тобто такий ПП не може бути використаний у діапазоні від 0 до 360° , до того ж у ньому не можна безпосередньо ввести кут α .

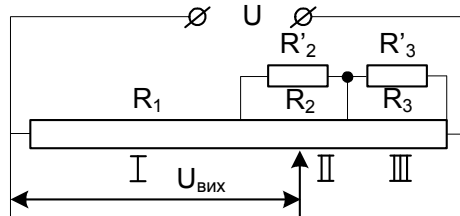


Рис. 3.23. Функціональний потенціометр з шунтуючими опорами

Щоб здійснити синусоїдну залежність вихідної напруги від кута повороту а движка в межах зміни α від 0 до 360° , застосовують синусно-косинусні ПП, сконструйовані на базі кругового потенціометра з рівномірною намоткою, окремі ділянки якої шунтовані постійними резисторами (рис. 3.24).

Намотка має 12 відпайок через 30° одна від одної. Два повзунки жорстко зв'язані між собою під кутом 90° . З повзунка 1 знімається вихід за синусоїдою, з повзунка 2 – за косинусоїдою.

Статична характеристика в режимі холостого ходу точно відповідає рівнянням

$$U_{вих1} = k_0 \sin \alpha_{ex},$$

$$U_{вих2} = k_0 \cos \alpha_{ex}$$

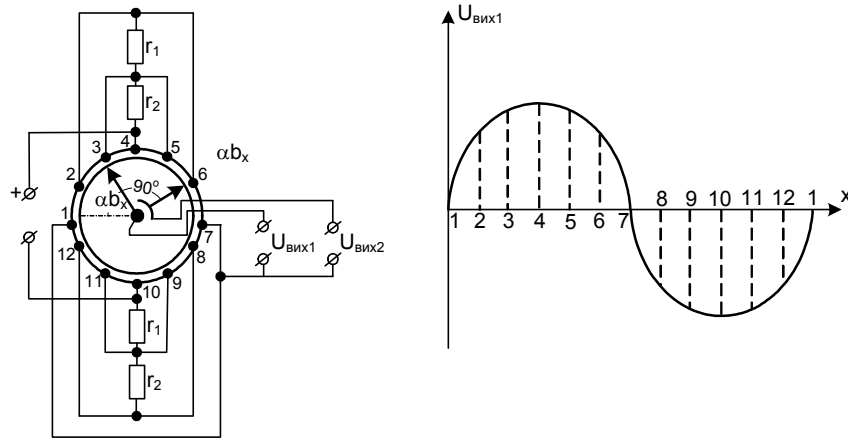


Рис. 3.24. Синусно-косинусний ПП з шунтуючими опорами

При $k_0=0,5U$ у точках $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ та інших статична характеристика має вигляд ламаної лінії із зламами в цих точках. Шунтуючі опори

$$r_1 = \frac{\sqrt{3}-1}{24(\sqrt{2}-3)} R = 0,114R;$$

$$r_2 = \frac{2-\sqrt{3}}{24(\sqrt{3}-1)} R = 0,0153R,$$

де R – повний опір кругової намотки (у будь-якій точці розриву). Методична похибка досягає максимуму у проміжних точках. Простіша конструкція плоского синусно-косинусного ПП з необмеженим кутом повороту α движка наведена на рис. 3.25.

Цей ПП являє собою плоску ізоляційну пластинку з рівномірно нанесеною на неї обмоткою і закріпленою навпроти центра пластинки віссю двох движків, зсунутих один відносно одного на 90° .

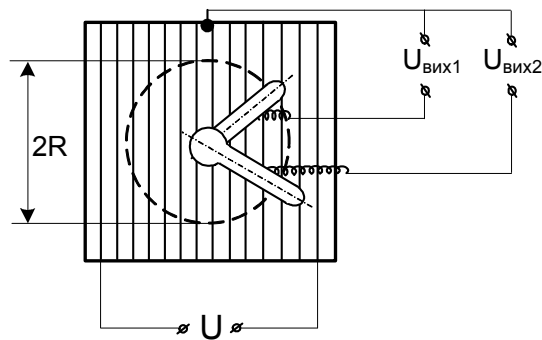


Рис. 3.25. Плоский синусно-косинусний ПП з необмеженим кутом повороту движка

Щоб уникнути зсуву, витки намотки приклеюють до пластини. Кінці намотки приєднують до джерела струму U . Повзунки, вісі яких не повинні проходити крізь пластинку, обертаються по контактній доріжці радіусом R .

Такий синусно-косинусний ПП має статичну характеристику холостого ходу вигляду

$$U_{вих1} = k_0 \sin \alpha_{ex};$$

$$U_{вих2} = k_0 \cos \alpha_{ex},$$

де $k_0 = (R/a)U$.

За допомогою кругового потенціометра з рівномірною намоткою можна дістати статичну характеристику холостого ходу трикутної (рис. 3.26) та іншої (рис. 3.27) форми.

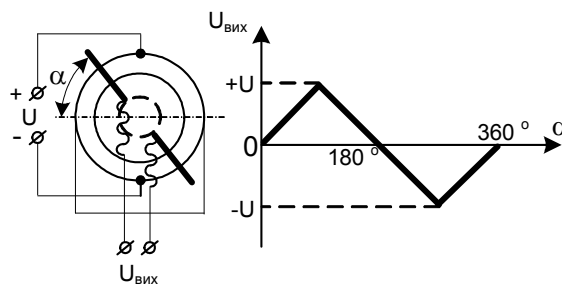


Рис. 3.26. Функціональний потенціометр з трикутною характеристикою

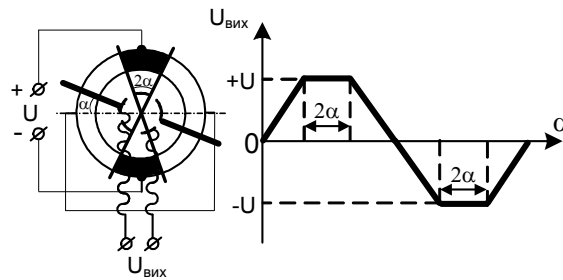


Рис. 3.27. Функціональний потенціометр з трапецієдною характеристикою

Точність і стабільність роботи ПП забезпечується:

- ретельною обробкою каркаса, який не повинен мати на своїй поверхні хвилястостей, задирок, подряпин і вибоїн;
- застосуванням проводу високої якості, однорідного за складом і товщиною, а також за товщиною ізоляції;
- акуратністю намотування і додержанням заданої напруги;
- правильним вибором просочувального лаку та режиму сушіння;
- правильним поліруванням контактної доріжки;
- ретельністю складання.

3.12. Способи коригування ПП

Практика виготовлення високоточних ПП показує, що відхилення від заданої залежності між переміщенням движка і опором, спричинені похибками технологічного процесу, досягають 0,2–0,5% для лінійних і 0,5–2% для функціональних кільцевих дротяних потенціометрів.

Розроблено різні способи компенсації помилок конструктивними методами, що дає змогу створювати ПП з точністю характеристик до 0,05%. Найбільшого поширення набули: радіальне профілювання каркаса, електричне профілювання шунтами, механізм з ламелями, кулісний механізм, механізм з профільованою мембраною, кулачковий механізм.

Радіальне профілювання каркаса. На обмотці резистора (рис. 3.28) вимірюють і зазначають ділянки, електричний опір яких відповідає певним значенням кута повороту движка. Каркас 1 резистора

такого ПП виготовляють дещо більшим за стакан 3, на якому він кріпиться. На стакан через рівні кутові проміжки наносять контрольні мітки 2. Під час складання потенціометра зазначені ділянки опорів суміщають з відповідними їм контрольними мітками стакана, притискаючи каркас резистора сухарями 4. Так досягають точного суміщення опорів ділянок обмотки із заданими кутовими положеннями движка 5 у всіх контрольних точках. Описаний спосіб застосовний лише для тонких каркасів діаметром 200...400 мм. Він не набув значного поширення, оскільки число контрольних точок не перевищує 8–12, а його збільшення призводить до зростання габаритних розмірів ПП.

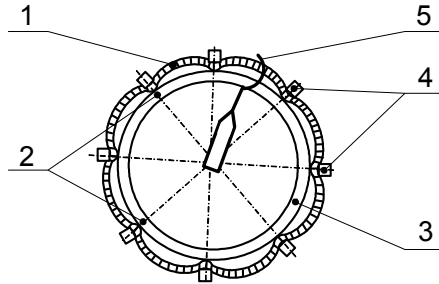


Рис. 3.28. Потенціометр з радіально профільованим каркасом

Електричне профілювання. Суть цього способу полягає в тому, що опір 1 лінійного потенціометра (рис. 3.29) поділяють на ряд секцій, шунтованих додатковими зовнішніми опорами 2, величина та число яких визначаються потрібним законом зміни опору і вимогами до точності відтворення функції. Цей спосіб застосовується для побудови функціональних потенціометрів.

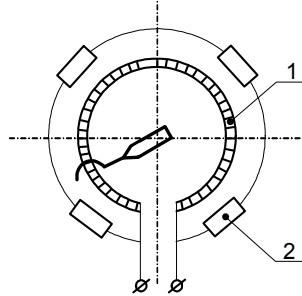


Рис. 3.29. Потенціометр з електричними шунтами

Отже, за допомогою опорів (шунтів) змінюється розподіл напруги по довжині лінійного потенціометра згідно із заданим законом. У літературі описано багато методів розрахунків потенціометрів із шунтами. Зазначений спосіб застосовується для відтворення найрізноманітніших аналітичних і табличних функцій і дає змогу отримати досить високу точність апроксимації, що становить 0,01–0,02%. Спосіб електричного профілювання складний і трудомісткий.

Коригуючі механізми. Принцип дії всіх механізмів компенсації похибок полягає в тому, що їх конструкція дає змогу надавати струмоміряючому контакту движка (щітці) додаткового переміщення. Величина і напрям такого переміщення залежать від величини та знака помилки для конкретного основного переміщення щітки, спричиненого поворотом осі движка. За способом задання додаткового переміщення коригуючі механізми можна поділити на ламельні, мембранні та кулачкові.

Ламельний механізм (рис. 3.30) містить вінцеподібну регулюючу доріжку, яка складається з кількох десятків ламелей 1 (одна ламель на 10° повороту движка). По ламелях переміщується ролик 2, закріплений на коромислі 3, на іншому кінці якого розміщено щітку 4. Похибки ПП компенсують, вимірюючи помилку для конкретного фіксованого положення движка 5 і підгинаючи відповідну ламель у той чи інший бік залежно від величини та знака помилки. Ролик притиснено до ламелей пружиною 6, і підгинання ламелі спричиняє додаткове компенсуюче переміщення щітки. Ламельний механізм простий при настроюванні, але його регулювання не піддається механізації.

Різновид ламельного механізму – кулісний механізм, принцип дії якого показано на рис. 3.31.

Мембранний механізм – один з найпоширеніших видів коригуючих пристроїв (рис. 3.32). Движок 8 вільно посаджений на вісь потенціометра і пружиною 2 притискається до коромисла 3. На іншому кінці коромисла розміщено ролик 4. Коромисло може обертатися на осі повідка 1, жорстко з'єданого з віссю ПП. Під час обертання осі ролик котиться по мембрані 6 і в разі, коли поверхня мембрани рівна, обертання осі повністю передається щітці, тобто кут повороту щітки дорівнює куту повороту осі. Похибку потенціометра компенсують, деформуючи мембрану гвинтами 5. Накочуючись на бугри й западини

мембрани, ролик надає додаткового переміщення щітці згідно з величиною та знаком помилки даного ПП.

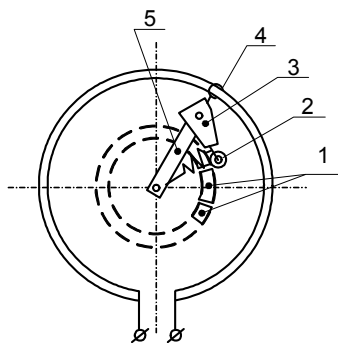


Рис. 3.30. Ламельний коригуючий механізм

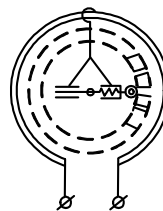


Рис. 3.31. Кулісний коригуючий механізм

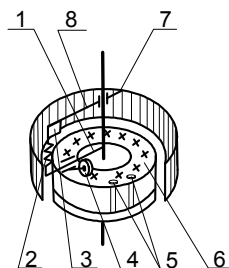


Рис. 3.32. Мембранний коригуючий механізм

Мембранний механізм має ряд істотних недоліків:

- помилки компенсуються не безперервно по всьому куту повороту потенціометра, а в окремих точках, між якими похибки залишаються некомпенсованими;
- мембрани схильні до температурних деформацій, що вносить додаткові похибки;
- механізми настраюють лише вручну.

Кулачковий механізм – найпрогресивніший пристрій, який дає змогу виконувати безперервну компенсацію похибок потенціометра в усьому діапазоні кутів повороту. Побудовано механізм таким чином (рис. 3.33). По кулачку 4 кільцевої форми, жорстко закріпленому в корпусі, котиться ролик 5. Ролик з'єднаний з коромислом 2, на іншому кінці якого розміщено щітку 3. Коромисло вільно повертається на осі

повідка 1, жорстко з'єднаного з віссю потенціометра. Додаткове переміщення щітки для компенсації помилки досягається відповідним змінюванням радіуса-вектора кулачка, тобто формою кулачка.

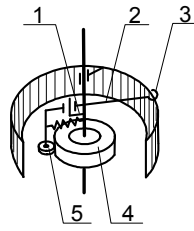


Рис. 3.33. Кулачковий коригуючий механізм

Кулачковий механізм дає змогу компенсувати похибки характеристики за всіма значеннями заданої функції і діставати теоретично ідеальне відтворення цієї функції з точністю, зумовленою лише розподільчою здатністю потенціометра.

Кожний екземпляр кулачка повинен мати профіль, який відповідає умовам компенсації індивідуальних похибок того ПП, для якого він призначений.

Завдання високопродуктивної автоматичної обробки форми кулачка згідно з помилками конкретного потенціометра розв'язується за допомогою спеціального фрезерного верстата з електромеханічною слідкуючою системою. Автоматизація коригування зумовлює широке застосування механізму в масовому виробництві прецизійних ПП (наприклад, серія ПП Київського заводу "Електроприлад"). Недоліки ПП з кулачковим механізмом впливають з його переваг. Так, у разі використання потенціометра в складних системах іноді буває потрібно скоригувати характеристику, зумовлену властивостями системи. Потенціометри з кулачковим механізмом не можна так настроювати і в цьому разі незамінні потенціометри з ламельним або мембранним механізмом.

3.13. Контрольні питання до розділу 3

1. Потенціометричний перетворювач (ПП). Чутливість ПП.
2. Основні конструктивні різновиди потенціометричних перетворювачів (ПП). Класифікація ПП. Способи компоновки ПП.
3. Розрахунок лінійних потенціометричних перетворювачів. Чутливість ПП.

4. Статична характеристика потенціометричного перетворювача. Похибки не лінійності потенціометричних перетворювачів. Методи усунення похибок не лінійності.
5. Визначення температурних і початкових напруг, виникаючих у потенціометричних перетворювачах. Визначення зносу щітки.
6. Синусно-косинусні потенціометричні перетворювачі.
7. Різновиди ПП. Переваги та недоліки. Застосування.
8. Схеми включення потенціометричних перетворювачів. Переваги і недоліки.
9. Основні характеристики потенціометричних перетворювачів.
10. Основні конструктивні різновиди потенціометричних перетворювачів у залежності від способу переміщення повзуна. Приклади.
11. Метод розрахунку функціонального потенціометричного перетворювача з шунтуючими опорами. Розрахунок.
12. Функціональні потенціометричні перетворювачі. Визначення. Застосування. Способи здійснення функціональної залежності.
13. Розрахунок функціонального потенціометричного перетворювача зі змінною довжиною витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркасу.

Розділ 4. ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ТП)

4.1. Загальна характеристика ТП

Тензометричні перетворювачі ґрунтуються на використанні зміни електричного опору провідних матеріалів (металів і напівпровідників) при розтягу та стиску їх у межах пружних деформацій.

У практиці вимірювальних перетворювачів тензоефект застосовується в двох напрямках [4; 16; 17; 29; 30; 35; 43; 45; 46; 50; 51; 57; 67; 70; 75; 76]:

– використання тензоефекту об'ємно стискаємого або розтягуємого тензочутливого матеріалу. Вхідна величина такого перетворювача – тиск газу або рідини, що його оточують. На цьому принципі будуються перетворювачі високих і надвисоких тисків, які виготовляють у вигляді безкаркасної обмотки, намотаної звичайно з манганінового дроту. Перетворювачами низьких тисків є германієвий або кремнієвий тензорезистор;

– застосування тензоефекту лінійно розтягуємого або стискаємого тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротяних, фольгових, плівкових або так званих вільних (навісних) ТП. Їх використовують для вимірювання малих переміщень, деформацій або зусиль, які спричинюють деформацію деталей.

Переваги ТП: малі маса і габаритні розміри; можливість вимірювати сталі та змінні деформації; можливість розміщувати їх у важкодоступних місцях; простота конструкції і дешевизна виконання.

Основні недоліки ТП: наявність поперечної тензочутливості для дротяних ТП, яка становить 0,25–1% (у фольгових і наклеюваних ТП вона практично відсутня); мала потужність вихідного сигналу ТП.

Клас точності вимірювальних пристроїв з тензоперетворювачами лежить у межах 0,2–1,5% [57; 67; 70].

Найчастіше застосовуються в промисловості такі різновиди ТП: провідникові (дротяні та фольгові); напівпровідникові; плівкові.

Провідникові дротяні ТП найпоширеніші.

4.2. Дротяні ТП

Дротяні ТП у загальному випадку (рис. 4.1) являють собою ряд петель тонкого тензочутливого дроту 1 (решітку) (число петель від 2 до

80) діаметром 0,01...0,05 мм з високоомного сплаву, наклеєних на ізоляційну підкладку (паперову прокладку) 2 і згори заклеєних також ізоляційною підкладкою (захисним папером). На рис. 4.1 позначено: b – ширина решітки; l_6 – довжина петлі або база ТП; $l_6=5...25$ мм; t – ширина петлі або крок петлі; $t \geq 2d=0,8...10$ мм; d – діаметр дроту ТП.

Для зміцнення місця закріплення вивідних кінців згори та знизу ТП приклеюють смужки паперу і роблять розвантажувальну петлю (рис. 4.1).

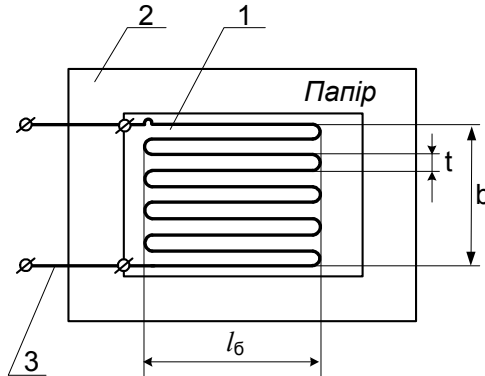


Рис. 4.1. Конструкція наклеюваного дротяного тензоперетворювача

До кінців дроту приєднані паянням або зварюванням виводи 3 із мідного проводу.

Опір таких ТП дорівнює 20...500 Ом.

Найчастіше для дротяних ТП застосовують такі матеріали: константан, ніхром, манганін, вісмут. Проте, найпоширенішими у вітчизняній тензометрії є ТП із спеціального константанового дроту діаметром 0,025...0,035 мм.

Характеристики матеріалів, що найчастіше застосовуються в ТП, наведено в табл. 4.1 [67; 70].

Електроізоляційні підкладки, між якими розміщують дріт ТП, виконують із цигаркового паперу, лакової плівки або цементу, скріплені між собою клеєм, лаком або цементом. Перетворювачі називають відповідно паперовими, лаковими або цементними.

Таблиця 4.1

Характеристики тензочутливих матеріалів

Матеріал	S	d , мкм	ρ , Ом·мм ² /м	$\alpha_R \cdot 10^{-6}$, 1/°C	
Константан МНМц-40-1,5	2,1	10; 20; 30	0,46...0,52	-20...110	
Сплав НМ23ХЮ	2,2±0,05	10;20; 30	1,45...1,60	<35	
Матеріал	E , Па	σ_B , Па	εl_{max} , %	$\alpha_l \cdot 10^6$, 1/°C	t_{max} , °C
Константан МНМц-40-1,5	$1,48 \cdot 10^{11}$	$65 \cdot 10^7$	–	14...15	500
Сплав НМ23ХЮ	$2,1 \cdot 10^{11}$	$(130-150) \times 10^7$	>18	11,5	500

Щоб отримати ТП з малою базою (1...3 мм), їх роблять двошаровими і виготовляють намотуванням тензочутливого дроту 1 (рис. 4.2) на трубчастий паперовий каркас 2, який після проклеювання розплющується і наклеюється на підкладку 3.

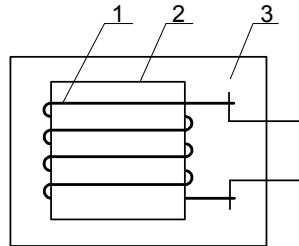


Рис. 4.2. Конструкція двошарового наклеюваного дротяного тензоперетворювача

Дротяні ТП бувають наклеювані і ненаклеювані. ТП наклеюють на зачищену поверхню деталі, що випробується.

Звичайно, до якості клею ставлять найвищі вимоги, оскільки найдрібніші бульбашки повітря в шарі клею різко зменшують чутливість ТП відносно розрахункового значення.

Із наявністю клею пов'язане явище повзучості ТП: поступове зменшення сприймаємої ТП деформації у разі сталої деформації випробуваної деталі.

Явище повзучості зумовлене релаксацією напруги в клейовому шарі, який передає деформацію від деталі, що випробується, до ТП. Повзучість характеризується повільною зміною опору після зняття навантаження.

В якості клеючих речовини залежно від умов роботи використовують різноманітні клеї та цементи [57; 67; 70]:

– за умов нормальних температур – ацетатно-целулоїдні та бакелітові клеї, клеї на основі органічних смол, кремненітрогліфталеві клеї тощо;

– за умов підвищених температур (до 700...800°C) – кремнійорганічні цементи та спеціальні цементи на основі рідкого скла або полісилоксани з різними наповнювачами.

Дротяний ТП реагує лише на складову вхідного сигналу деформації вздовж петель.

Ця властивість використовується для визначення напряму деформації за її складовими, які вимірюються за допомогою двох датчиків, наклеєних поруч, але з взаємно перпендикулярним розміщенням петель.

Особливість наклеюваних ТП полягає в тому, що це перетворювачі разової дії, тобто вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт.

Тому функція перетворення робочого ТП не може бути визначена, а для її оцінювання знаходять функцію перетворення аналогічного (так званого градуювального) перетворювача з тієї ж самої партії.

Такий спосіб оцінювання характеристик робочих ТП можливий лише в тому випадку, коли властивості перетворювачів всієї партії цілком ідентичні, а залишкові деформації, що спричинені твердненням клею під час приклеювання робочих і градуювальних перетворювачів, також однакові. Похибка від неідентичності в разі ретельного приклеювання ТП і доброякісного клею звичайно не перевищує 1,5 %.

4.3. Ненаклеювані (вільні) ТП

Ненаклеювані, або так звані вільні ТП, використовуються для багаторазового вимірювання малих деформацій, переміщень і сил. Найчастіше вільні ТП використовуються в датчиках тиску.

Конструктивно вільні ТП для вимірювання деформацій і малих переміщень виконуються у вигляді одного або ряду тензочутливих дро-

тів, закріплених кінцями на дві спільні струмоізолювані пластини або планки, які можуть кріпитися до деталі або вузлів, що випробуються, і деформацію або переміщення яких потрібно вимірювати. Відносне переміщення планок є вхідною величиною таких перетворювачів – наприклад, у датчиках тиску одна планка нерухома, а друга переміщується під дією перетворюваного тиску.

При цьому ділянки дроту можуть з'єднуватися як паралельно (рис. 4.3, а), так і послідовно (рис. 4.3, б).

Для вимірювання сили Київським інститутом автоматики розроблено вільний ТП (рис. 4.4). Він виконаний у вигляді мембрани 1 з жорстким центром, яка кріпиться фланцем до основи 2 гвинтами. До мембрани прикріплені стояки 3, навколо яких намотано дріт 4 з тензоматеріалу, кінці його виведено на клеми. Якщо прикласти силу P , мембрана деформується, стояки розходяться в боки і дріт з тензоматеріалу розтягується.

У процесі проектування такого ТП слід враховувати, що за максимального зусилля межа пружної деформації ТП не повинна перевищуватися. Згідно з цими міркуваннями матеріал для вільних ТП вибирають з найбільшою межею пружної деформації.

Переваги ненаклеюваних ТП – відсутність поперечної тензочутливості, можливість використання для багаторазових вимірювань, відсутність повзучості.

Недолік ненаклеюваних ТП – їх складніше, порівняно з дротяними і фольговими ТП, використовувати для вимірювання деформацій у важкодоступних місцях.

В якості тензочутливого дроту в ненаклеюваних ТП найчастіше використовують тензометричний константановий дріт або дріт зі сплаву НМ23ХЮ. Основні характеристики цих дротів наведено в табл. 4.1.

4.4. Фольгові ТП

Фольгові ТП являють собою тонку стрічку товщиною 0,01...0,02 мм з фольги, на якій частину металу вибрано (наприклад, травленням) так, що частина, яка залишилася, утворює показану на рис. 4.5 решітку з виводами.

Ця решітка закріплюється (найчастіше приклеюється) між плівками з лаку. Форма петель може бути довільною.

Завдяки потовщенням ТП працюватиме при поздовжній деформації (по осі Oy) і не працюватиме в разі поперечної деформації (по осі Ox) (рис. 4.5).

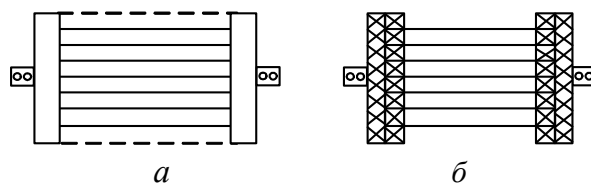


Рис. 4.3. Конструкція вільного тензоперетворювача із з'єднанням:
а – паралельним; б – послідовним

Фольгові ТП виготовляють таким чином. Спочатку наносять фото-емусію, роблять з негативу відбиток решітки на фользі, проявляють, дублять (роблять рисунок кислотостійким), наносять на зворотний бік шар лаку, а потім травильною кислотою вибирають зайвий метал і отримують тензорезистор потрібного рисунку.

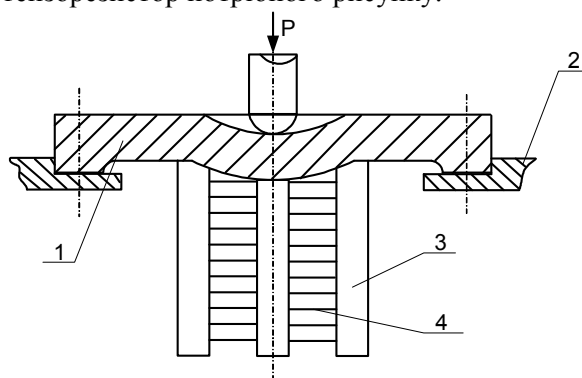


Рис. 4.4. Конструкція вільного тензоперетворювача
для вимірювання зусиль

Замість методу травлення можуть бути використані фотомеханічні процеси і методи офсетного друку, що застосовуються в поліграфії. Переваги фольгових ТП:

- відсутність поперечної тензочутливості;
- менші, порівняно з дротяними ТП, маса та габаритні розміри;
- кращі умови охолодження, завдяки чому через фольгові ТП можна пропускати значно більші струми, ніж через дротяні;

- безінерційність, тобто можливість вимірювати швидкозмінні деформації;
- забезпечення кращої якості приклеювання до деталі, що випробовується, порівняно з дротяними ТП;
- можливість розміщення у важкодоступних місцях;
- наявність найсучаснішої технології виготовлення;
- простота конструкції та дешевизна виготовлення.

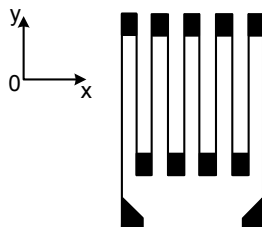


Рис. 4.5. Фольговий тензоперетворювач

Недоліки фольгових ТП: обмежене застосування, оскільки на їх виході малопотужний сигнал (необхідно використовувати високочастотну, часто досить громіздку вторинну апаратуру); порівняно низький опір, який не перевищує 50 Ом.

4.5. Плівкові ТП

Плівкові ТП мають досить широке застосування. Метод виготовлення плівкових ТП: тензочутливий матеріал наноситься на плівку вакуумною возгонкою і подальшою конденсацією на плівці. Для виготовлення плівкових ТП застосовують як металеві (наприклад, титаноалюмінієвий сплав), так і напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

Переваги та недоліки плівкових ТП такі самі, як і фольгових. При виготовленні фольгових і плівкових ТП можна передбачити будь-який рисунок їх решітки (їх істотна перевага), що дає змогу застосовувати їх для дослідження механічних напружень деталей найрізноманітнішої конфігурації.

4.6. Напівпровідникові ТП

Напівпровідникові ТП – це тонкі (до 0,01 мм) пластини або стрижні з напівпровідникового матеріалу. До кінців такої пластини спеціальним методом кріплять металеві виводи. Напівпровідникові ТП приклеюють по всій довжині або по кінцях до поверхні, що контролюють.

Перевага напівпровідникових ТП – дуже висока чутливість, яка досягає кількох сотень одиниць і є на один-два порядки вищою, ніж у дротяних ТП.

Недоліки напівпровідникових ТП: низька механічна міцність; значний гістерезис; нестабільність характеристики.

Матеріали напівпровідникових ТП: найчастіше використовуються такі напівпровідники, як германій, кремній, сурм'янистий індій; штучні суміші “тензоліти” (графіт з тонким кварцовим піском і смолою, графіт з крейдою та шеланом або каніфоллю, вугілля або сажа з бакелітовим лаком).

Широкого застосування набули напівпровідникові монокристалічні ТП. Матеріали, що використовуються в них, мають кубічну кристалічну решітку, в якій розрізняють три кристалографічні напрями, позначувані індексами Міллера. Напряма, позначений індексом [111], збігається з діагоналлю куба, [110] – з діагоналлю грані і [100] – з ребром куба.

Чутливість напівпровідникового ТП залежить від орієнтації його чутливого елемента (нитки) відносно кристалографічних напрямів, тобто в напівпровідниках на відміну від металів спостерігається анізотропія тензоефекту. Сучасна напівпровідникова тензометрія має кілька напрямів. Перший з них пов'язаний з розвитком поодиноких наклеюваних тензорезисторів. Поодинокі напівпровідникові тензорезистори – аналоги провідникових. Тепер випускають досить багато типів наклеюваних напівпровідникових ТП з підкладками і без підкладок типів Ю-8 і Ю-12. Конструктивно вони оформлені у вигляді гантелеподібної пластини кремнію 1 (рис. 4.6), вирізаної в кристалографічному напрямі найбільшого тензорезистивного ефекту. На кінці пластини наносять контактний шар 2 і термокомпресією або іншим способом приєднують виводи 3.

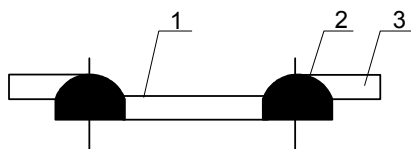


Рис. 4.6. Напівпровідниковий тензоперетворювач типу Ю-8

Коефіцієнт тензочутливості таких елементів, наклеєних на сталь 45 лаком ВЛ-931 при температурі $25 \pm 10^\circ\text{C}$ і відносній деформації до

0,1%, становить 110 ± 20 ; база $l_6 = 5 \dots 7$ мм, номінальний електричний опір 100...200 Ом.

До переваг таких ТП належить висока чутливість, мініатюрність, можливість отримати високий рівень вихідного сигналу. Проте їм притаманні і істотні недоліки: складність монтажу, великий вплив температури, пружна недосконалість, великий розкид метрологічних характеристик, внаслідок чого вони поступаються за точністю дротяним тензорезисторам. Похибка поодиноких напівпровідникових ТП становить 0,5–1%.

Другий напрямок, що ґрунтується на досягненнях фізики твердого тіла й відповідній технології, передбачає створення інтегрального тензомодуля. В такому ТП (рис. 4.7) пружний елемент 1 виконується з монокристалічного напівпровідника (звичайно кремнію), на якому дифузією або іонним легуванням формують тензочутливу схему 2. При цьому тензорезистор – єдина ланка пружного елемента і похибки через пружну недосконалість відсутні. Чутливий елемент ізолюють від тіла пружного елемента за рахунок запірних властивостей $p - n$ переходів. Залежно від призначення тензомодулі виготовляють у вигляді балок, стовпчиків або мембран.

Перетворювачі з інтегральними тензомодулями відрізняються від поодиноких напівпровідникових ТП вищою точністю. Проте широке застосування інтегральних тензомодулів можливе лише в разі їх масового випуску і в мікромініатюрному виконанні, що є досі складним технічним завданням. Певні обмеження на їх використання накладає і крихкість матеріалу чутливого елемента.

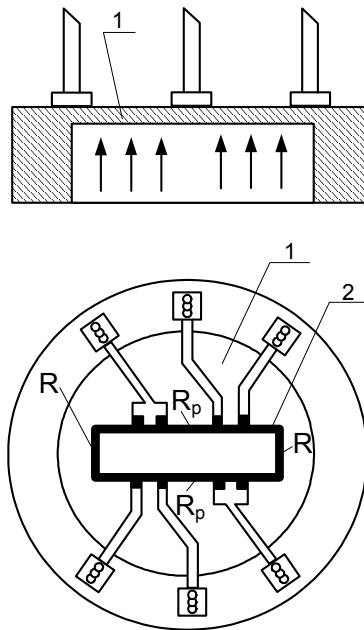


Рис. 4.7. Тензомодуль мембранного датчика тиску

Останнім часом виник ще один напрямок напівпровідникової тензометрії, пов'язаний із застосуванням напівпровідникових мостових тензорезисторних структур [111], які являють собою монолітне з'єднані в схему одинарного мосту напівпровідникові тензорезистори. Мостова тензорезисторна структура у вигляді квадрату (рис. 4.8, а) універсальна для пружних елементів, що працюють на розтяг, стиск або на згин, а структура на рис. 4.8, б – для мембранних датчиків тиску. Габаритні розміри таких перетворювачів становлять 2...6 мм при товщині 20...25 мм.

Датчики, виконані на основі мостових тензорезисторних структур, точніші порівняно з поодинокими напівпровідниковими резисторами (їх похибка 0,1–0,2%), а порівняно з тензомодулями – технологічніші й універсальніші.

Використання тензорезистивного ефекту в $p-n$ переході через великі технологічні складності й невідтворюваність метрологічних характеристик досі не дало істотних результатів.

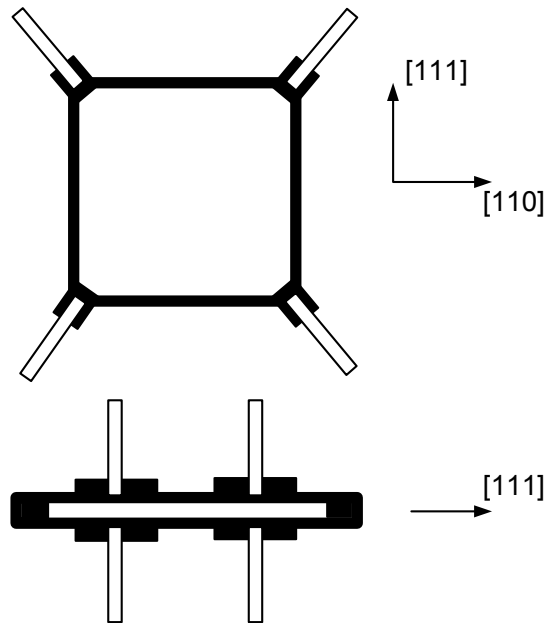


Рис. 4.8. Напівпровідникові мостові тензорезистивні структури

4.7. Основні техніко-метрологічні характеристики ТП

До основних техніко-метрологічних характеристик ТП належать тензочутливість, повний опір, повзучість, механічний гістерезис, температурна нестабільність, динамічні характеристики.

Тензочутливість визначається головним чином тензорезистивними властивостями матеріалу чутливого елемента, проте значною мірою залежить від конструкції перетворювача, матеріалу основи, виду і умов полімеризації клею та інших факторів.

Тензочутливість готових ТП практично не піддається точному розрахунку, оскільки вона може істотно відрізнятись від тензочутливості вихідного матеріалу.

Значення коефіцієнта тензочутливості перетворювача залежить від впливу технологічних факторів на відтворення тензорезистивних властивостей матеріалу, а також від зігнутості в місцях заокруглення дроту, особливо в дротяних ТП. У цих місцях утворюються ділянки, що не сприймають деформацію в напрямі осі бази. Зменшення чутливості, спричинене цим фактором, тим більше, чим менша вимірюва-

льна база (у двошарових перетворювачів із зменшеною базою чутливість може зменшитися на 20–30%). Істотний вплив на результуючу чутливість має поперечний тензоэффект, зумовлений наявністю ділянок дроту, які перпендикулярні до осі бази перетворювача і сприймають поперечну деформацію. Цього недоліку практично повністю позбавлені фольгові та плівкові ТП, в яких переріз провідного шару в місці згину може бути значно збільшений.

Основна характеристика чутливості матеріалу до механічної деформації – коефіцієнт відносної тензочутливості S . Він визначається як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини провідника:

$$S = \frac{\varepsilon R_x}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R_x / R_x}{\Delta l / l}.$$

Найпростішим ТП, який служить для вимірювання зусиль, є дріт, що розтягується силами P_x (рис. 4.9).

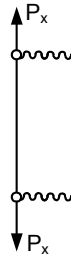


Рис. 4.9. Найпростіший тензоперетворювач для вимірювання зусиль

Опір дроту

$$R_x = \rho \frac{l}{q},$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу; l – довжина провідника; q – площа поперечного перерізу провідника ТП.

Прологарифмувавши вираз для R_x , дістанемо:

$$\ln R_x = \ln \rho + \ln l - \ln q.$$

Диференціюючи цей вираз і записуючи в часткових прирощеннях, маємо

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q}$$

або

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta l}{l} \left[\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I - \frac{\Delta q / q}{\Delta l / l} \right]$$

Водночас відомо, що

$$\frac{\Delta q / q}{\Delta l / l} = -2\sigma,$$

де σ – коефіцієнт Пуассона, що характеризує відносну зміну площі поперечного перерізу дроту при розтягу або стиску (величина стала в межах пружних деформацій і додатна для всіх металів, крім нікелю). Тоді

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta l}{l} \left(\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I + 2\sigma \right)$$

Звідси коефіцієнт відносної тензочутливості ТП

$$S = \frac{\Delta R_x / R_x}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I + 2\sigma.$$

Чутливість ТП завжди більша за одиницю і визначається властивостями ТП. Типові перерізи ТП зображено на рис. 4.10.

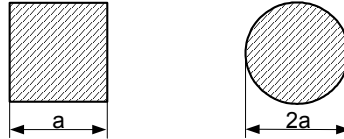


Рис. 4.10. Поперечний переріз тензодроту

Для провідникових ТП

$$\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \ll 1 + 2\sigma, \quad S = 1 \dots 1,8;$$

для напівпровідникових ТП

$$\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \gg 1 + 2\sigma, \quad S = 10 - 100.$$

Сила P_x пов'язана з подовженням дроту за законом Гука

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P_x}{Eq},$$

де E – модуль пружності матеріалу дроту. Тоді

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{P_x}{Eq} \left[\frac{\Delta \rho / \rho}{P_x / Eq} + I + 2\sigma \right].$$

Матеріал деталі, що досліджується, і дроту ТП має зазнавати механічних напружень, які не перевищують межі пружних деформацій, в противному разі в ньому відбудуться необоротні деформації. Тому допустиме значення напружень не перевищує 20–30% межі пружності.

Оскільки значення відносної деформації $\Delta l/l$ в межах пружних властивостей матеріалу не перевищує $2,5 \cdot 10^{-3}$, то при $S=0.5 \dots 4$ відносна зміна опору $\Delta R_x/R_x = (1,25 \dots 10) \cdot 10^{-3}$, тобто не перевищує 1%.

З огляду на це опір ТП повинен задовольняти дві вимоги: мати високу часову стабільність; мати незначний температурний коефіцієнт опору.

Основні вимоги, що ставляться до ТП:

- якомога більше значення коефіцієнта тензочутливості;
- високий питомий електричний опір;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення чутливого елемента перетворювача має бути по можливості таким, що дорівнює температурному коефіцієнту лінійного розширення об'єкта, що досліджується.

У напівпровідниках n -типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках p -типу додатний (табл. 4.2).

Для рідких тензорезистивних матеріалів (ртуті, електролітів), які практично не змінюють свого об'єму в процесі деформації, коефіцієнт тензочутливості $S=2$.

Справді, у разі сталого об'єму V опір R провідника зі сталим поперечним перерізом по всій довжині пропорційний до квадрата довжини:

$$R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l^2}{V},$$

а при $V=\text{const}$ і $\rho=\text{const}$ його зміна

$$\Delta R = \frac{\rho}{V} 2l\Delta l.$$

Звідси

$$S = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 2.$$

Таблиця 4.2

Основні характеристики тензочувливих матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт тензочувливості S	Модуль пружності E , ГПа	ТКС, 10^{-6} 1/К	ТК лінійного розширення, 10^{-6} 1/К	Питомий опір, $\text{мк} \times \text{Ом} \cdot \text{м}$	ТермоЕРС з міддю, $\text{мк} \cdot \text{В} / \text{К}$	ТК тензочувливості, 10^{-6} 1/К
Константан	1,9... 2,1	150	± 50	14...15	0,46... 0,50	-40	-
Ніхром	2,1... 2,3	180	22	14	0,9... 1,7	+22	-
Платинородій	5,1... 5,5	-	1700	-	0,2	-	-
Елінвар	0,7... 3,8	176	300	0,9	0,84	0,3	-
Германій (дендрит): <i>n</i> -типу [111]	-150	155	1500	0,1...6	$0,25 \times 10^4$	-	3000
<i>p</i> -типу [111]	+100	155	3000... 8000	0,1...6	$1,1 \times 10^4$	-	400... 5000
Кремній: <i>n</i> -типу [100]	-130	130	6000	0...4	$0,35 \times 10^4$	-	3000
<i>p</i> -типу [111]	+175	190	1300	0...4	$7,8 \cdot 10^4$	-	2000

Визначимо вираз повного опору ТП. Відомо, що

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = S$$

або в разі заміни $\Delta \rightarrow d$

$$\frac{dR}{R} = S \frac{dl}{l}.$$

Проінтегрувавши здобутий вираз з урахуванням початкових умов, отримуємо:

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{l}{l_0} \right)^S, \quad R = R_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^S.$$

Проте

$$l = l_0 + \Delta l, \quad a \frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_l.$$

Тоді

$$R = R_0 \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right)^S = R_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^S = R_0 (1 + \varepsilon_l)^S.$$

Враховуючи опір коротких сторін петель ТП, маємо:

$$R = R_0 (1 + \varepsilon_l)^S + R_n.$$

Отриманий вираз визначає повний опір ТП.

Умова оптимальності роботи рівноплечового мосту з ТП $R=R_n$. Повзучість проявляється у вигляді зміни вихідного сигналу при заданому і незмінному значенні деформації і звичайно визначається як

$$\sigma_{II} = \frac{\Delta \varepsilon_l}{\varepsilon_l},$$

де $\Delta \varepsilon_l$ – зведена до входу зміна вихідного сигналу; ε_l – задана відносна деформація.

Причиною повзучості є пружна недосконалість основи та клею. В межах пружного діапазону деформацій повзучість більшості ТП не перевищує 0,5–1% за першу годину після приклеювання і відповідно 1–1,5% за 6 годин.

Механічний гістерезис, як і повзучість, зумовлений пружною недосконалістю основи та клею і чисельно визначається як зведена до входу різниця значень вихідного опору для одного і того ж самого значення деформації за умови, що дане значення деформації досяга-

ється в разі плавного її зростання і плавного зменшення. Для різних типів ТП механічний гістерезис лежить у межах 0,5–5%.

Температурна нестабільність, або вплив температури навколишнього середовища на основні параметри ТП, полягає, з одного боку, у зміні опору ТП за рахунок його температурного коефіцієнта опору, а з іншого – в появі додаткових механічних напружень через різниці в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу тензорезистора та деталі, що досліджується.

Якщо β_d і β_n – температурні коефіцієнти лінійного розширення деталі, що досліджується, і підкладки ТП, то відносна деформація ТП, зумовлена зміною навколишньої температури на $\Delta\Theta$, дорівнює:

$$\varepsilon_{\Theta} = \frac{\Delta l_{\Theta}}{l} = (\beta_d - \beta_n),$$

а зміна його опору при цьому

$$\Delta R = SR \frac{\Delta l_{\Theta}}{l} = SR(\beta_d - \beta_n).$$

Оскільки зміна опору ТП зумовлена наявністю температурного коефіцієнта опору матеріалу чутливого елемента $\Delta R_{\alpha} = R\alpha_{\Theta}$, то загальна зміна опору ТП, спричинена зміною температури навколишнього середовища на $\Delta\Theta$, дорівнює:

$$\Delta R_{\Theta} = R\alpha_{\Theta} + SR(\beta_d - \beta_n) = R[\alpha_{\Theta} + S(\beta_d - \beta_n)].$$

Компенсаційні опори можуть бути обчислені за методикою [51].

Для виготовлення ТП широко використовують термокомпенсовані тензометричні дроти, температурний коефіцієнт опору яких можна отримати спеціальним відпалюванням заданої величини, яка відповідає температурному коефіцієнту матеріалу об'єкта, що досліджується.

Якщо умова термокомпенсації дроту не виконується, то значення компенсаційного опору нуля ТП можна обчислити за наступною методикою.

Зміна опору ТП на 1°C зміни температури дорівнює:

$$\Delta R_{\Theta} = R[\alpha_{\Theta} + S(\beta_d - \beta_n)],$$

де R – опір ТП; α_{Θ} – температурний коефіцієнт опору дроту; S – коефіцієнт тензочутливості; β_d , β_n – температурний коефіцієнт лінійного розширення відповідно матеріалу об'єкта та дроту.

Зміна опору ТП і зміна компенсаційного опору (увімкненого послідовно з ТП)

$$\Delta R_{\beta} = R_{\beta} \alpha_{\kappa},$$

(де α_{κ} – температурний коефіцієнт компенсаційного опору) мають бути однаковими, тому компенсаційний опір

$$R_{\beta} = R \frac{\alpha_{\Theta} + S(\beta_{\text{Д}} - \beta_{\text{П}})}{\alpha_{\kappa}}.$$

Основна динамічна характеристика ТП – їх власна частота, значення якої для наклеюваних ТП становить 100...30 кГц.

Власна частота ТП визначає граничну частоту процесу, що досліджується, при якій частотними похибками можна знехтувати.

Для досліджень змінних деформацій зазвичай вибирають тензорезистивний перетворювач, власна частота якого хоча б у 5–10 разів перевищує частоту деформації.

Важливим параметром ТП є допустима потужність P , яка може розсіюватися в ТП за умови, що його перегрів не перевищить допустимого значення.

Допустима потужність ТП перебуває в певній залежності від його геометричних розмірів, що можна використовувати під час визначення P для відомих тензорезисторів, а також геометричних розмірів проєктованих перетворювачів згідно із заданою допустимою потужністю.

Відведення теплоти від ТП до деталі, що досліджується, через шар клею та підкладку значно перевищує тепловіддачу в навколишнє повітря. Тому можна вважати, що практично вся теплота відводиться в деталь, що досліджується; за площу S для плівкових і фольгових ТП беруть поверхню ТП, звернуту до деталі, що досліджується, а для дротяних – половину циліндричної поверхні дроту чутливого елемента.

Питома потужність дротяних, фольгових і напівпровідникових ТП незалежно від розсіюваної в них потужності і повної поверхні, що її займає чутливий елемент, звичайно коливається в незначних межах: $P_{\text{пит}} = 26...28 \text{ кВт/м}^2$ (або мВт/мм^2).

4.8. Розрахунок ТП

Основні етапи розрахунку ТП: вибір конструкції, матеріалу; розрахунок геометричних розмірів; розрахунок чутливості та похибки.

Вихідними даними для розрахунку є вимоги технічного завдання (ТЗ) на розробку ТП.

Згідно з вимогами ТЗ конструкцію і матеріал ТП вибирають, зважаючи на межі вимірювання, умови встановлення ТП на об'єкті вимірювання (матеріал об'єкта вимірювання, розміри, кривизна та стан місця під встановлення ТП, можливість виконання термообробки); температурний діапазон роботи і точність. Частіше застосовують дротяні ТП, оскільки вони забезпечують вимірювання деформації в широких амплітудному і температурному діапазонах з достатньою точністю. Якщо вимірювання виконують при від'ємних температурах, перевагу надають плівковим (лаковим) ТП, при високих температурах – цементним.

Малі деформації у вузькому температурному діапазоні вимірюють за допомогою напівпровідникових ТП завдяки їх високій чутливості.

Для розрахунку геометричних розмірів ТП визначальними є вимоги щодо живлення вимірювального кола.

Допустимий струм живлення наклеюваного дротяного ТП може бути розрахований за формулою [51]:

$$I_{доп} = \sqrt{7,3 \cdot 10^{10} \cdot d^3},$$

де d – діаметр дроту, м (вибирають мінімально можливим).

Для плівкових і фольгових ТП допустимий струм $I_{доп}$ значно більший, оскільки в цих ТП умови охолодження кращі, ніж в дротяних. Величина $I_{доп}$ цих ТП залежить від співвідношення ширини m до товщини z смужки ТП. Так, при співвідношенні $m/z=10$, $I_{доп}=1,4 I_{доп}$ дротяного ТП того ж самого перерізу. При $m/z=40$ $I_{доп}=1,95 I_{доп}$.

Допустимий струм напівпровідникових ТП можна брати таким, що дорівнює допустимому струму фольгових ТП, а вільних ТП – d 1,5 рази нижчий, ніж наклеюваних.

За даною напругою живлення і залежно від вибраного вимірювального кола обчислюють опір ТП.

Базу і ширину дротяного ТП визначають з таких передумов.

Для зменшення габаритних розмірів датчика потрібно зменшувати базу тензорезистора. Проте при заданому опорі в матеріалі ТП це спричинює збільшення ширини і все більша частина дроту виявляється неробочою, через що знижується коефіцієнт чутливості. Тому відношення розміру бази l_6 , ТП до його ширини b має бути в межах 2...5, тобто

$$l_6 / b = n = 2 \dots 5.$$

Зменшити ширину ТП можна за рахунок скорочення відстані між окремими дротиками. Проте надмірне зменшення цієї відстані спричиняє температурний вплив одного боку петлі ТП на другий, що потребує зниження допустимого струму, і, крім того, обмежене технологічними можливостями намотки ТП. Крок намотки $t \gg 2l$. Практично відстань між витками вибирають у 10...20 раз більшою за діаметр дроту.

Враховуючи, що відношення розміру бази ТП до його ширини $n = l_6 / b$, знаходимо число витків ТП

$$W = \frac{l}{2l_6} = \frac{l}{2bn},$$

де $l = \pi R d^2 / 4\rho$ – довжина тензодроту; R – опір ТП; d – діаметр дроту; ρ – питомий опір ТП.

Ширина ТП може бути виражена через число витків та крок намотки: $b = (2W - 1)t$.

Динамічні властивості ТП визначаються динамічними властивостями об'єкта вимірювання, верхня гранична частота вимірювання деформації ТП становить 100 кГц; амплітудний діапазон ТП визначається межею міцності тензочутливого матеріалу і для найпоширеніших дротяних ТП на паперовій основі, плівкових та фольгових ТП становить 0,005–2%.

Потужність, яка розвивається в ТП, дорівнює

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Питома площа поверхні охолодження не повинна бути нижчою за норму $\delta \geq \delta_{\text{доп}}$, яка для ТП, наклеєних на метал, приблизно дорівнює 2 см/Вт, а для ТП, наклеєних на пластмасу, – 5 см/Вт.

Оскільки площа поверхні охолодження $S = (2bl_6)4$, для чотирьох тензодатчиків мостової схеми, мають виконуватися умови

$$\sigma = \frac{S}{P} \geq \sigma_{\text{доп}}, \quad \frac{8bl_6}{U^2/R} \geq \sigma_{\text{доп}},$$

$$8bl_6R \geq \sigma_{\text{доп}}U^2, \quad U \leq \sqrt{\frac{8bl_6R}{\sigma_{\text{доп}}}}.$$

Похибка ТП характеризується такими складовими: повзучістю, гістерезисом, нелінійністю, температурною похибкою нуля та чутливістю, похибкою від розкиду тензочутливості тощо.

Основна похибка вимірювального кола δ може бути значно меншою і зумовлена в основному стабільністю й точністю напруги живлення δ_T та елементів вимірювального кола δ_K . Формулу для розрахунку основної похибки ТП можна подати у вигляді

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_K^2}.$$

Найважливіші характеристики ТП – чутливість, основна похибка, напруга живлення, опір.

4.9. Способи ввімкнення ТП

Тензометричні перетворювачі вмикаються за мостовою схемою в одне, два або чотири плеча. При цьому в два протилежних плеча вмикаються перетворювачі, що реагують на одну й ту ж саму деформацію (наприклад, розміщені поруч), а в два інших плеча – ті, що реагують на ту ж саму деформацію, але протилежного знака (наприклад, розміщені з іншого боку пластини, що згинається). Міст з двома, чотирма ТП має чутливість відповідно у 2 і 4 рази більшу, ніж міст з одним ТП.

Для компенсації температурної похибки ТП використовують, наприклад, такий спосіб. Два однакових перетворювачі розміщують на місці вимірювання (один – на деталі, що деформується, другий – на деталі, яка не зазнає деформації) і вмикають їх як два суміжні плеча мостової схеми.

Тоді прирости опорів ТП за рахунок температури однакові в обох плечах мосту і не впливають на результат вимірювання.

Мостову схему ввімкнення ТП зображено на рис. 4.11.

Із чотирьох відібраних тензоперетворювачів у плечі r_1 та r_3 вмикаються перетворювачі з найбільшим опором. Тоді за допомогою змінного резистора, який ввімкнено в плече r_4 , і який має опір одного порядку з розкидом значень перетворювачів r_1, r_2, r_3 та r_4 , можна встановити міст у стан рівноваги за відсутності деформації. За наявності деформації на виході у режимі холостого ходу буде напруга

$$U_{вих} = U \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{(r_2 + r_3)(r_1 + r_4)}$$

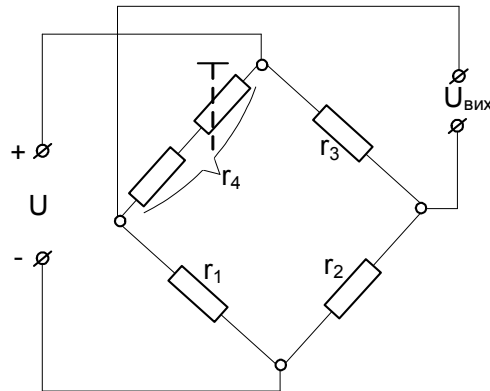


Рис. 4.11. Мостова схема ввімкнення тензоперетворювачів

У разі одного активного ТП, увімкненого в плече r_1 ,

$$r_1 = r_D \text{ і } r_2 = r_3 = r_4 = r_0$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{2(r_D + r_0)}$$

У разі двох активних ТП, ввімкнених в плечі r_1 і r_3 ,

$$r_1 = r_3 = r_D,$$

$$r_2 = r_4 = r_0,$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{r_D + r_0}$$

У разі чотирьох активних ТП $r_1=r_3=r_{D1}$ та $r_2=r_4=r_{D2}$ (якщо наклеюємо два ТП згори, а два інших ТП знизу і беремо в них приріст довжини з різними знаками)

$$U_{вих} = U \frac{r_{D1} - r_{D2}}{r_{D1} + r_{D2}}$$

4.10. Розміщення ТП на об'єкті

Тензометричні перетворювачі 1 будь-якого типу приклеюють за певною технологією [5] до об'єкта вимірювання 3 (рис. 4.12). Виводи

ТП припаюють до контактної колодки 2, приклеєної до об'єкта вимірювання.

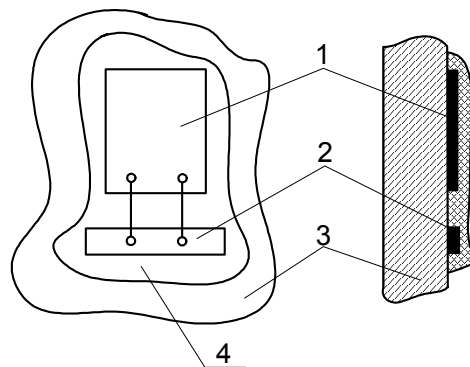


Рис. 4.12. Розміщення тензоперетворювача на об'єкті

Через контактну колодку ТП вмикають у вимірювальне коло, доповнюване або від подільника напруги, або від мосту. Додаткові елементи розміщені в блоці перетворювача.

Для захисту ТП від впливу вологості навколишнього середовища та забезпечення стійкості до дії механічних факторів ТП і монтажну схему покривають спеціальною герметизуючою сумішшю 4.

4.11. Приклад розрахунку ТП

Опір навантаження $r_n=3000$ Ом; кількість ТП у схемі мосту – 1; база $l_6=20$ мм; ширина $b=10$ мм; ТП клеїться на метал; питома допустима площа поверхні охолодження $\sigma_{\text{доп}}=2 \cdot 10^2$ мм²/Вт. Потрібно розрахувати ТП.

Розв'язання

Вибираємо дріт з константану. Діаметр дроту $d=0,025$ мм. Питомий опір матеріалу дроту $\rho=0,45 \cdot 10^{-3}$ Ом·мм.

Обчислимо крок $t \geq 2d = 0,05$ мм. Виберемо $t=0,07$ мм. Визначимо число петель ТП за формулою $2W = b/t = 10/0,07 = 143$, звідки $W=72$.

Знайдемо вихідний внутрішній опір r мосту за формулою $r=r_0+r_n$ взявши до уваги, що

$$r_0 = \frac{4\rho l_6}{\pi d^2}, \quad r_n = \frac{4\rho l_6}{\pi d^2},$$

де

$$q = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Тоді $r=r_0+r_n=2890$ Ом. Розраховане значення $r < r_n=3000$ Ом, тобто розрахунок виконано не за оптимальним варіантом, але близьким до нього.

Напруга на вході ТП

$$U = \sqrt{\frac{8bl_0 r}{\sigma_{don}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 2890}{2 \cdot 10^2}} = 152 \text{ В}.$$

Потужність, споживана в ТП,

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{152^2}{2890} = 8 \text{ Вт}.$$

4.12. Контрольні питання до розділу 4

1. Тензоперетворювачі (ТП). Визначення, призначення, переваги і недоліки. Застосування. Принципи дії.
2. Основні конструктивні різновиди ТП. Переваги і недоліки. Способи підключення ТП. Розрахунок ТП.
3. Вираз повного опору тензоперетворювача. Відносна тензочутливість.
4. Вираз чутливості ТП.
5. Ненаклеювані тензоперетворювачі. Переваги і недоліки. Застосування. Чутливість тензоперетворювача.
6. Фольгові тензоперетворювачі. Переваги і недоліки. Методи виготовлення. Матеріали. Чутливість тензоперетворювача.
7. Плівкові тензоперетворювачі. Переваги і недоліки, метод виготовлення. Схеми підключення.
8. Розміщення ТП на об'єкті.
9. Напівпровідникові тензоперетворювачі. Переваги і недоліки. Матеріали. Приклади застосування.
10. Дротяні наклеювані тензоперетворювачі. Переваги і недоліки. Матеріали. Приклади застосування. Чутливість.
11. Синусно - косинусні тензометричні перетворювачі. Приклади схем.

Розділ 5. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНТАКТНОГО ОПОРУ (ПКО)

5.1. Загальна характеристика ПКО

Перетворювачі контактного опору належать до групи перетворювачів активного опору.

Вони ґрунтуються на залежності перехідного опору R контактів від зусилля їх стиску.

Конструктивно ПКО виконують у вигляді стовпчиків, набраних з вугільних або з графітових дисків або шайб (рис. 5.1), тому їх інколи називають вугільними або графітовими перетворювачами.

ПКО застосовують у приладах для вимірювання вібрацій і змінних тисків, у вимірювальних пристроях деяких типів регуляторів напруги та частоти обертання електродвигунів, як вугільні мікрофони для перетворення звукових коливань у електричні.

До числа безперечних переваг ПКО належать такі: досить висока чутливість до переміщення; дешевизна і простота конструкції; висока потужність вихідного сигналу.

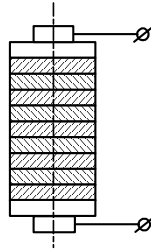


Рис. 5.1. Конструкція перетворювача контактного опору

Перетворювачі контактного опору мають і деякі недоліки: залежність опору від температури та вологості навколишнього середовища; нелінійна залежність між деформацією та опором перетворювача, яка характеризується петлею гістерезису (1–2%); погана відтворюваність характеристик перетворювача від зразка до зразка.

Характеристика таких перетворювачів визначається співвідношенням

$$R = \frac{n}{S_{III}} \left(\rho \delta + \frac{k}{F} \right),$$

де R – перехідний опір ПКО, Ом; n – число дисків або шайб ПКО; $S_{ш}=(\pi/4)\cdot(D^2-d^2)$ – площа шайби, см²; D, d – зовнішній та внутрішній діаметри шайби, см; ρ – питомий опір матеріалу (наприклад, для електродного вугілля $\rho=(3-10/10^{-3})$ Ом·см); δ – товщина шайби (звичайно $\delta=0,05\dots0,35$ см); k – сталий коефіцієнт, зумовлений якістю поверхні контактних шайб (визначається експериментально), Ом·кг·см²; F – зусилля стиску, кг.

Розміри стовпчика вибирають з умови тепловіддачі

$$\frac{I^2 R}{\mu S_6} \leq t_{\max} - t_{n\max},$$

де I – допустимий струм, який для ПКС становить [51] 0,2 А; $\mu=(1,12-1,5/10^{-3})$ Вт/(см²·К) – коефіцієнт тепловіддачі; $S_6=\pi D_{пб}$ – площа бічної поверхні ПКО, см²; t_{\max} – максимальна допустима робоча температура ПКО (звичайно 180...230°C); $t_{n\max}$ – максимальна температура навколишнього середовища.

На рис. 5.2 показано диференціальну схему вмикання перетворювача контактного опору.

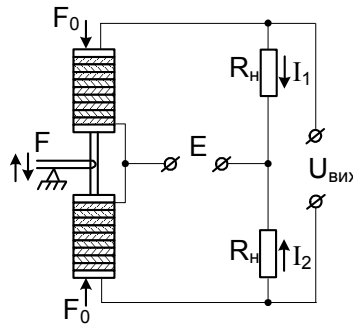


Рис. 5.2. Диференціальна схема вмикання перетворювача контактного опору

Початкове зусилля F_0 , що стискує вугільні стовпчики, вибирають набагато більшим за максимальне значення сили F , створюваної сприймаючим елементом. З її появою опір одного з перетворювачів зменшується, а другого збільшується, і на виході виникає напруга $U_{\text{вих}}$ знак якої залежить від знаку сили F .

Нехай опір перетворювача за наявності початкового стиску

$$R = R_0 \frac{F_0}{F_0 \pm F},$$

де R_0 – опір при початковому стиску.

Тоді напруга на виході диференціальної схеми

$$U_{\text{вих}} = I_1 R_n - I_2 R_n;$$

$$I_{12} = \frac{E}{R_n + R_0 \frac{F_0}{F_0 \pm F}};$$

$$U_{\text{вих}} = E \left(\frac{R_n}{R_n + R_0 \frac{F_0}{F_0 + F}} - \frac{R_n}{R_n + R_0 \frac{F_0}{F_0 - F}} \right)$$

або

$$U_{\text{вих}} = E \left(\frac{F_0 + F}{F_0 + F + \frac{R_0}{R_n} F_0} - \frac{F_0 - F}{F_0 - F + \frac{R_0}{R_n} F_0} \right).$$

Позначивши відносне зусилля F/F_0 через α , дістанемо

$$U_{\text{вих}} = E \left(\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + \frac{R_0}{R_n}} - \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha + \frac{R_0}{R_n}} \right),$$

Тобто

$$U_{\text{вих}} = 2E \frac{\frac{R_0}{R_n} \alpha}{\left(1 + \frac{R_0}{R_n}\right)^2 - \alpha^2}.$$

Вважаючи, що деформація пропорційна до сили, робимо висновок: величина α дорівнює також відносному переміщенню, а саме відношенню переміщення до зміни переміщення x_0 , спричиненого силою F_0 .

Визначимо чутливість схеми вмикання ПКО до переміщень (деформацій):

$$k_x = \frac{dU_{\text{вих}}}{dx} = \frac{1}{x_0} \left(\frac{dU_{\text{вих}}}{d\alpha} \right) = \frac{2E}{x_0} \frac{\frac{R_0}{R_n}}{\left(1 + \frac{R_0}{R_n}\right)^2 - \alpha^2}.$$

Перепишемо здобутий вираз для k_x , врахувавши, що $\alpha \ll 1$:

$$k_x = \frac{2E}{x_0} \frac{\frac{R_0}{R_n}}{\left(1 + \frac{R_0}{R_n}\right)^2}.$$

Коефіцієнт підсилення k_x (або чутливість схеми до переміщення) має максимум при $R/R_0=1$, тобто коли досягається рівність опору навантаження початковому опору ПКО. Максимальна чутливість до переміщень

$$k_{x\text{max}} = \frac{1}{2} \frac{E}{x_0}.$$

Оскільки початкові переміщення x_0 звичайно не перевищують часток міліметра, тобто малі, чутливість ПКО до переміщення досить велика і багаторазово перевищує чутливість до переміщення дротяних потенціометричних перетворювачів [16, 17, 51].

Визначимо чутливість схеми вмикання ПКО до умов вимірювань:

$$k_F = \left(\frac{dU_{\text{вих}}}{dF} \right) = \frac{1}{F_0} \left(\frac{dU_{\text{вих}}}{d\alpha} \right) = \frac{2E}{F_0} \frac{\frac{R_0}{R_n}}{\left(1 + \frac{R_0}{R_n}\right)^2}.$$

Аналогічно розглянутому дістанемо, що чутливість до зусиль не перевищує

$$k_F = \frac{1}{2} \frac{E}{F_0}.$$

Враховуючи, що початкові зусилля стиску вугільних стовпчиків досягають кількох десятків кілограмів, тобто значні, очевидно, що чутливість ПКО до зусиль мала.

Основна перевага ПКО, що зумовила їх застосування, – значна потужність вихідного сигналу. Наприклад, вугільні перетворювачі авіаційних регуляторів напруги з повітряним охолодженням допускають розсіювання потужності порядку 100...200 Вт. Такий самий порядок має потужність, що виділяється у навантаженні цих перетворювачів.

5.2. Приклад практичного застосування ПКО

Як приклад конкретного промислового використання ПКО розглянемо застосування його в регуляторі напруги РН-180 2-ї серії, призначеному для автоматичного підтримання в заданих межах напруги генераторів постійного струму СТГ-18ТМ і ГС-24А під час змінювання їх навантаження і частоти обертання якоря в робочому діапазоні [18].

На рис. 5.3 показано схему роботи регулятора напруги, де $F_{ем}$ – сила електромагніту; $F_{ст}$ – сила реакції вугільного стовпчика; $F_{пруж}$ – сила пружини якоря; 1 – вугільний стовпчик, набраний з шайб; 2 – пружина мембранного типу; 3 – якір електромагніту, жорстко зв'язаний з пружиною; 4 – осердя електромагніту; 5 – робоча обмотка електромагніту регулятора.

На якір електромагніту діє три сили: сила електромагніту $F_{ем}$, сила реакції вугільного стовпчика $F_{ст}$ і сила пружини якоря $F_{пруж}$. Коли алгебраїчна сума сил, що діють на якір, дорівнює нулю, $F_{ем} = F_{ст} - F_{пруж}$, якір перебуває в стані спокою і опір вугільного стовпчика не змінюється.

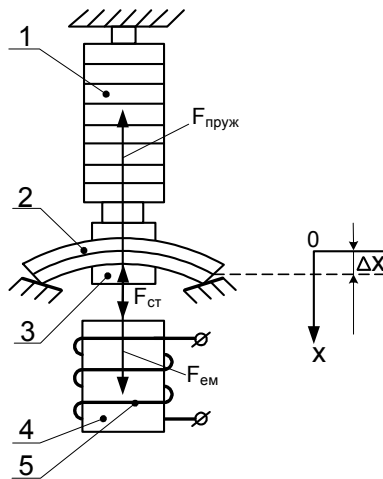


Рис. 5.3. Схема роботи вугільного регулятора напруги

З підвищенням напруги генератора збільшується струм у робочій обмотці регулятора і, отже, зростає сила електромагніту. Рівновага сил, що діють на якір електромагніту, порушується, і якір переміщується в напрямі електромагніту. При цьому тиск на вугільний стовпчик зменшується, і його опір зростає, що спричинює зменшення струму збудження генератора і зниження напруги до рівня, близького до заданого.

У разі зниження напруги генератора нижче встановленого рівня сила електромагніту зменшується, рівновага сил порушується, і якір відходить від електромагніту. При цьому тиск на вугільний стовпчик зростає і його опір зменшується. У результаті струм збудження генератора збільшується, напруга генератора зростає до заданого рівня, після чого переміщення якоря припиняється.

У новому положенні якір регулятора перебуває в рівновазі, але величини сил, що діють на нього, не змінилися, і зусилля пружини якоря зменшилося за рахунок її прогину, а зусилля електромагніту зменшилося за рахунок збільшення повітряного зазору.

Характеристики електромагніту і пружини якоря вибрані так, що невелика зміна напруги на робочій обмотці регулятора спричиняє зміну опору вугільного стовпчика, яка потрібна для підтримання напруги генератора на заданому рівні.

5.3. Контрольні питання до розділу 5

1. Перетворювачі контактної опору. Конструкція. Принцип дії. Переваги і недоліки. Застосування. Схема підключення.
2. Основні етапи роботи КП. Матеріали.
3. Чутливість ПКО до впливу сил, переміщень
4. Диференціальна схема включення перетворювачів контактної опору.
5. Приклади застосування ПКО.

Розділ 6. ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ЄП)

6.1. Загальна характеристика ЄП

Ємнісні вимірювальні перетворювачі використовуються для перетворення лінійних або кутових переміщень, тисків, вібрацій, прискорень, рівнів рідини в електричний сигнал [1, 3, 15 – 17, 30, 43, 45, 46, 51, 67]. ЄП застосовують для контролю швидкозмінних процесів, пульсуючих тисків, вібрацій, як перетворювачі непогодження, а також у випадках, коли потрібне мінімальне навантаження переміщуваних деталей або мають бути відсутні механічні зв'язки. В авіаційній техніці широко використовуються ємнісні паливоміри.

ЄП являє собою конденсатор, що складається з двох чи більше пластин, відокремлених одна від одної шаром повітря чи іншим діелектриком.

Основні переваги ЄП:

- висока чутливість;
- невеликі маса та габаритні розміри;
- мале значення зворотної дії.

Недоліки ЄП [51, 67]:

- високий внутрішній опір, що робить його малопотужним, а головне, дуже сприйнятливим до впливу завад і наводок;
- відносно невисока стабільність крутості характеристики в зв'язку із зміною геометричних розмірів ЄП при дії температури, а діелектричної проникності – при дії вологості;
- значний вплив паразитних ємностей, зокрема ємності екранованого проводу (екранування обов'язкове в зв'язку з великим впливом завад і наводок), який з'єднує ЄП з іншими елементами схеми;
- необхідність роботи на порівняно високій частоті (від одиниць кілогерц і вище), яка змушує застосовувати спеціальне джерело живлення ЄП, стабілізоване за напругою й частотою;
- для зняття сигналу з ЄП потрібно мати високочутливий вторинний перетворювач з великим вхідним опором.

Практично ЄП – це конденсатор змінної ємності, керований вхідною величиною (звичайно переміщенням).

6.2. Основні конструктивні різновиди ЄП

Ємність будь-якого конденсатора у фарадах залежить від трьох основних параметрів: площі пластин S , відстані δ між пластинами і діелектричної проникності середовища ε між пластинами конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}.$$

Із наведеної формули бачимо, що зміни ємності можна досягти, змінивши значення однієї з величин δ , S або ε . Прологарифмуємо вираз для C :

$$\ln C = \ln \varepsilon + \ln S - \ln \delta.$$

Продиференціювавши і перейшовши до запису в частинних приростах, дістанемо

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{\Delta \delta}{\delta_0}.$$

Якщо

$$S = \text{const}, \varepsilon = \text{const}; \frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \delta}{\delta_0},$$

то маємо варіант конструкції ЄП із змінним зазором, або із змінною відстанню між пластинами (рис. 6.1, а, б):

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 \pm \Delta}.$$

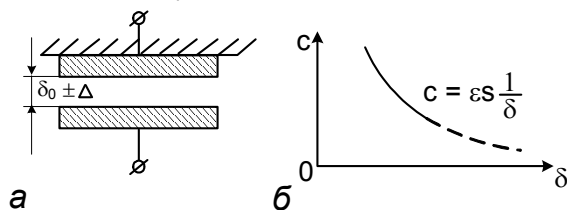


Рис. 6.1. Ємнісний перетворювач із змінним зазором:
а – конструкція; б – характеристика

Якщо

$$\varepsilon = \text{const}, \delta = \text{const}; \frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta S}{S_0}.$$

то можна дістати варіант конструкції ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин (рис. 6.2, а, б):

$$C = \frac{\varepsilon(S \pm \Delta)}{\delta}$$

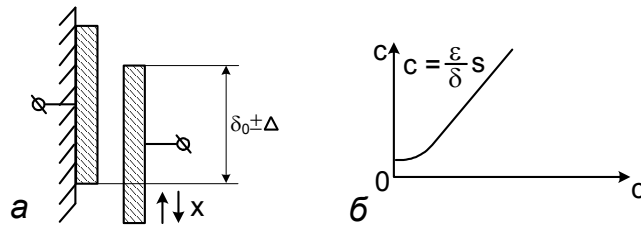


Рис. 6.2. Ємнісний перетворювач із змінною площею: а – конструкція; б – характеристика

Якщо

$$\delta = const, S = const; \frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0},$$

то можна дістати варіант конструкції ЄП із змінною діелектричною проникністю (рис. 6.3, а, б):

$$C = \frac{(\varepsilon_0 \pm \Delta \varepsilon)S}{\delta}$$

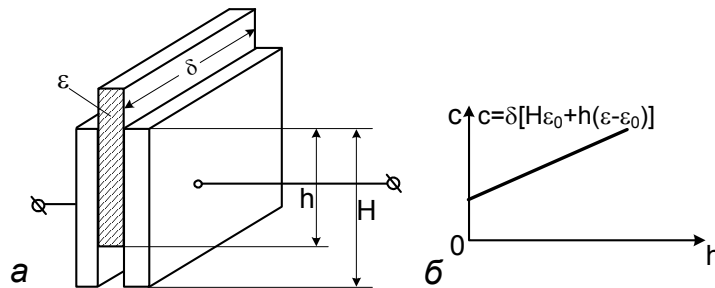


Рис. 6.3. Ємнісний перетворювач із змінною діелектричною проникністю середовища: а – конструкція; б – характеристика

Ємнісні перетворювачі зі змінною діелектричною проникністю застосовуються значно рідше за інші.

На рис. 6.1, а показано схему ЄП зі змінним зазором δ . Характеристика цього датчика $C=f(\delta)$ при сталих значеннях ε та S змінюється за гіперболічним законом (див. рис. 6.1, б).

На рис. 6.2, а зображено схему ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин. Його характеристика $C=f(S)$ змінюється майже лінійно (див. рис. 6.2, б).

На рис. 6.3, а показано схему ЄП із змінною діелектричною проникністю. Його характеристика $C=f(\varepsilon)$ при сталих значеннях δ і S також змінюється лінійно (див. рис. 6.3, б).

Щоб збільшити чутливість ЄП, застосовують диференціальні конструкції з рухомою середньою пластинною і змінним зазором (рис. 6.4). Під час переміщення середньої пластини ємність однієї половини такого перетворювача зростає, а другої половини зменшується, тобто чутливість такого диференціального ЄП порівняно з простим перетворювачем збільшується.

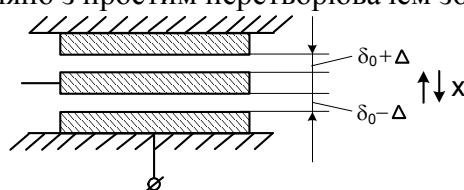


Рис. 6.4. Диференціальний ємнісний перетворювач із змінним зазором

Для диференціального ЄП ємність кожної з його половин

$$C_{12} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 + \Delta}; C_{13} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 - \Delta}.$$

Щоб збільшити потужність вихідного сигналу, відстань δ_0 між пластинами потрібно вибрати мінімальною. Проте при цьому зменшується і можливе переміщення рухомої пластини.

На рис. 6.5 зображено диференціальний ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин. Ємність кожної з його половин

$$C_{12} = \frac{\varepsilon S}{\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{\psi}{\pi} \right); C_{13} = \frac{\varepsilon S}{\delta} \left(\frac{1}{2} - \frac{\psi}{\pi} \right),$$

де ψ – кут повороту середньої пластини, що переміщується в межах $\pm \pi/2$.

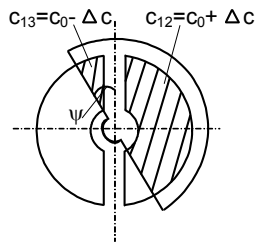


Рис. 6.5. Диференціальний ємнісний перетворювач із змінною площею

6.3. Основні схеми ввімкнення ЄП

Для перетворення зміни ємності у відповідні зміни сили струму, напруги або частоти найчастіше застосовують мостову або резонансну схему вмикання ЄП.

Мостову схему ввімкнення зображено на рис. 6.6. За середнього положення рухомої пластини, коли $C_{12}=C_{13}$, тобто приріст $\Delta=0$, міст збалансований і напруга на його виході дорівнює нулю.

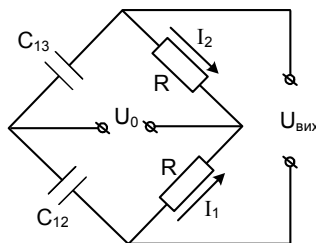


Рис. 6.6. Мостова схема ввімкнення ЄП

У разі зміщення пластини $C_{12}=C_0+\Delta C$; $C_{13}=C_0-\Delta C$. На виході мосту виникне напруга $U_{вих}$.

Визначимо залежність вихідної напруги від зміщення рухомої пластини за припущення, що міст навантажено на опір, який дорівнює нескінченності, тобто $R_n=\infty$. Практично це відповідає випадку, коли вихідна напруга $U_{вих}$ подається на вхід підсилювача. При цьому величина $U_{вих}$ визначається за виразом (тут маємо справу з комплексним значенням вихідної напруги)

$$U_{вих} = R(I_1 - I_2)$$

або згідно із схемою на рис. 6.6

$$\bar{U}_{вих} = \frac{U_0 R}{R + \frac{1}{j\omega_0 C_{12}}} - \frac{U_0 R}{R + \frac{1}{j\omega_0 C_{13}}},$$

де ω_0 – кутова частота напруги живлення.

Підставивши сюди значення C_{12} і C_{13} , дістанемо

$$\bar{U}_{вих} = \frac{2jU_0 R \omega_0 \Delta C}{2jR\omega_0 C_0 - \omega_0^2 R^2 C_0^2 + \omega_0^2 R^2 \Delta C^2 + 1}.$$

Припускаємо, що зміна ємності ΔC в разі переміщення середньої пластини невелика, тобто $\Delta C \ll C_0$. Отже, в знаменнику доданком, що містить ΔC^2 , можна знехтувати, і тоді наближено вихідна напруга

$$\bar{U}_{вих} = \frac{2jU_0 R \omega_0 \Delta C}{1 + 2jR\omega_0 C_0 - \omega_0^2 R^2 C_0^2}.$$

У тому разі, коли ЄП виконано як перетворювач кутового переміщення, маємо

$$C = C_0 \pm \Delta C; \quad \Delta C = 2C_0 \frac{\psi}{\pi}; \quad C_0 = \frac{\epsilon S}{2\delta}.$$

Згідно з цим вираз вихідної напруги набирає вигляду

$$\bar{U}_{вих} = \frac{4\psi}{\pi} \frac{jU_0 R \omega_0 \Delta C_0}{1 + 2jR\omega_0 C_0 - \omega_0^2 R^2 C_0^2}.$$

Після нескладних перетворень можна знайти модуль вихідної напруги

$$U_{вих} = \frac{4\psi}{\pi} \frac{U_0 R \omega_0 C_0}{\sqrt{4R^2 \omega_0^2 C_0^2 + 1 + \omega_0^4 R^4 C_0^4 - 2\omega_0^2 R^2 C_0^2}}.$$

або

$$U_{вих} = \frac{4\psi}{\pi} U_0 \frac{R \omega_0 C_0}{1 + \omega_0^2 R^2 C_0^2}.$$

Щоб визначити умови максимальної крутості характеристики, розв'язуємо рівняння $dU_{вих}/dR = 0$; маємо

$$\frac{dU_{вих}}{dR} = \frac{4\psi}{\pi} U_0 \frac{\omega_0 C_0 (1 + \omega_0^2 R^2 C_0^2) - 2R^2 \omega_0^3 C_0^3}{(1 + \omega_0^2 R^2 C_0^2)^2}.$$

Прирівнюючи здобутий вираз до нуля і розв'язуючи відносно R , маємо умову максимальної крутості характеристики схеми

$R=1/(\omega_0 C_0)$, за якої формула для визначення вихідної напруги набирає вигляду

$$U_{вих} = \frac{2U_0}{\pi} \psi.$$

Резонансну схему вмикання ЄП показано на рис. 6.7. У такій схемі ЄП – елемент резонансного контуру, і зміна ємності ЄП спричиняє зміну резонансної частоти, що, у свою чергу, приводить до зміни амплітуди струму, який протікає по контуру.

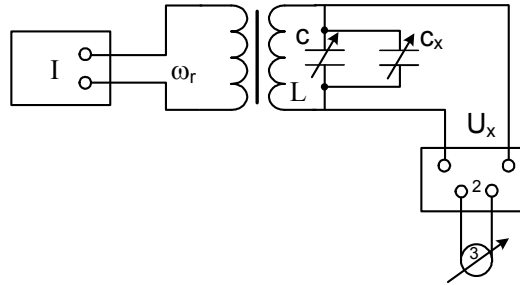


Рис. 6.7. Резонансна схема ввімкнення ЄП

Генератор 1 високої частоти живить індуктивно пов'язаний з ним контур, що складається із індуктивності L , змінного конденсатора підстроювання C і ЄП C_x . Напруга U_x , що знімається з контуру, підсилюється підсилювачем 2 і вимірюється гальванометром 3. За допомогою конденсатора підстроювання C контур за середнього положення рухомої пластини ЄП настраюється на частоту, близьку до резонансної з частотою генератора. При цьому домагаються такого настроювання, щоб напруга, яка знімається з контуру, дорівнювала приблизно половині напруги при резонансі U_p . У цьому разі робоча точка N характеристики схеми, показаної на рис. 6.8, розміщена на лінійній частині половини резонансної кривої. Цим забезпечується лінійна залежність і однозначність показів гальванометра як функції від зміни ємності ΔC_x . ЄП під час переміщення його рухомої пластини і, крім того, досягається стійкість роботи схеми. Із цих міркувань

положення робочої точки у точці N вигідніше, ніж у точці M , хоча напруга на виході схеми і буде вдвічі меншою.

Роботою на резонансній ділянці характеристики досягається висока чутливість схеми. Невелика зміна положення рухомої пластини ЄП спричиняє різку зміну вихідної напруги, що знімається зі схеми.

Якщо відома ємність C_x ЄП і знехтувати значенням активного опору, то можна легко вибрати параметри контура L, C , з умови резонансу

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C + C_x)}} \cong \omega_r,$$

де ω_0 – частота резонансного контуру, що дорівнює частоті генератора, який живить схему.

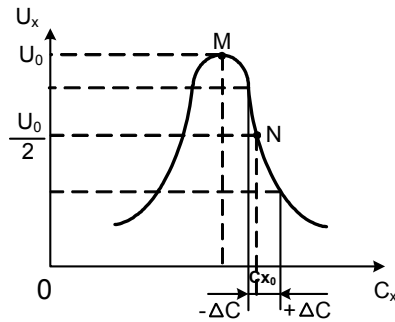


Рис. 6.8. Вихідна характеристика резонансної схеми ввімкнення ЄП

Недолік резонансної схеми – необхідність стабілізувати частоту напруги живлення.

Величина зворотного впливу ЄП визначається силою електростатичного притягання між пластинами, H або G_n ,

$$F_e = \frac{dW_e}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU_0^2}{2} \right) = \frac{U_0^2}{2} \frac{dC}{d\delta},$$

де W_e – енергія електростатичного поля, Дж; δ – зазор, м; C – ємність, ф; U_0 – напруга джерела живлення, В.

Середня за період величина сили дорівнює половині її амплітудного значення. Для диференціального датчика потрібно визначити різницю сил взаємодії рухомої пластини з двома нерухомими.

Використовувати ЄП на промисловій частоті практично неможливо. Справді, ємність основного типу змінного (повітряного) конденсатора без значного збільшення його габаритних розмірів не перевищує 100...200 пФ. Опір ЄП з ємністю $C=100 \text{ пФ}=100 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ на промисловій частоті $f=50 \text{ Гц}$ визначається як

$$R = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 30 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

Таке велике значення опору ЄП виключає можливість його практичного застосування для вимірювальних цілей через сильний вплив паразитних параметрів (витікання тощо).

Потужність, що споживається при цьому ЄП,

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{100^2}{30 \cdot 10^7} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт,}$$

де U – напруга живлення, взята такою, що дорівнює 100 В.

Природно, що потужність, яка віддається ЄП у колі навантаження, має бути ще меншою.

З підвищенням частоти живлення ЄП недоліки, проілюстровані прикладом, згладжуються. Проте вони лишаються істотними, коли взяти до уваги, що на практиці уникають використовувати частоту живлення понад 50...60 кГц, оскільки з підвищенням частоти все важче діставати суворо пропорційне зусилля та перетворювати сигнал. В авіаційній техніці, як уже зазначалося, великого поширення набули ємнісні паливоміри [3], в основу цих приладів покладено ЄП, що ґрунтуються на зміні діелектричної проникності. Такий ЄП являє собою циліндричний конденсатор з внутрішнім електродом, зовнішнім та ізоляційним шарами. Між ізоляційним шаром і зовнішнім електродом міститься шар рідини, рівень якої потрібно виміряти. Ємність змінюється в результаті зміни діелектричної проникності конденсатора, як що змінюється рівень рідини палива.

Ємнісні паливоміри використовують для вимірювання кількості всіх видів палива, але вони майже незамінні при вимірюванні кількості хімічно активних рідин, що застосовуються як паливні компоненти в двигунах. Істотні переваги мають ємнісні паливоміри порівняно з поплавковими: відсутність у чутливому елементі (яким є ЄП) рухомих частин, менші похибки під час кренів і прискорень літака.

До ЄП ставлять такі вимоги:

- всі елементи мають бути ізольовані один від одного;
- геометричні розміри не повинні змінюватися від температури, вологості, часу, динамічних навантажень.

Звичайно ЄП вмикають в мостову схему. Оскільки внутрішній опір їх великий, а власна ємність невелика, потрібно ретельно екранувати всі підвідні проводи, щоб уникнути наводок, усувати паразитні витікання, що шунтують робочу ємність; вторинний перетворювач, підключений до виміральної діагоналі мосту, має споживати незначну потужність, тобто мати великий вхідний опір.

Щоб збільшити ємність, іноді вдаються до паралельного з'єднання ЄП з однойменно зарядженими обкладками

$$C = \sum_{i=1}^n C_i,$$

де C_i – ємність i -го ЄП.

Для зменшення ємності іноді вдаються до послідовного з'єднання ЄП з різнойменно зарядженими обкладками:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

6.4. Приклад розрахунку ЄП

Потрібно розрахувати ЄП за таких даних: частота джерела живлення $f=4000$ Гц; напруга джерела живлення $U=115$ В; площа поверхні пластини $S=20 \cdot 10^{-4}$ м²; відстань між пластинами $\delta=0,5 \cdot 10^{-3}$ м; середовище між обкладками ЄП – вакуум.

Розв'язання

1. Визначимо ємність:

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta},$$

де ε – діелектрична проникність вакууму;

$$\varepsilon = \frac{1}{36 \cdot 10^9 \pi} \Phi / \text{м}.$$

Тоді

$$C = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-4}}{36 \pi \cdot 10^9 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 35,4 \cdot 10^{-12} \Phi = 35,4 \text{ нФ}.$$

2. Знайдемо кутову частоту напруги живлення:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 4000 = 2,52 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}.$$

3. Обчислимо активний опір, що забезпечує максимальну чутливість схеми:

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2,52 \cdot 10^4 \cdot 35,4 \cdot 10^{-12}} \text{ c} / \Phi = 1,12 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 1,12 \text{ МОм}.$$

4. Визначимо потужність, що розсіюється на активному опорі:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{115^2}{1,12 \cdot 10^6} \text{ В} / \text{Ом} = 0,012 \text{ Вт}.$$

5. Обчислимо силу зворотного впливу:

$$F = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\delta} = \frac{U^2}{2} \frac{C}{\delta} =$$

$$= \frac{115^2 \cdot 35,4 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 115^2 \cdot 10^{-9} \cdot 35,4 \text{ Н} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

6.5. Приклад практичного застосування ЄП як приладу для вимірювання прискорення

На рис. 6.9 показано схему ємнісного приладу для вимірювання прискорення з плоским конденсатором і змінним зазором [1].

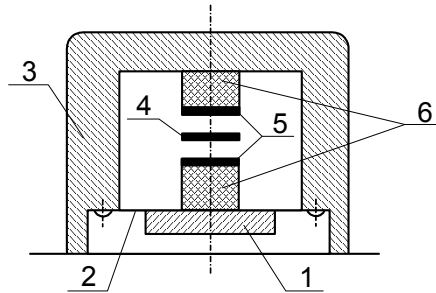


Рис. 6.9. Ємнісний прилад для вимірювання прискорення

Сейсмічна маса 1 закріплена на жорсткій металевій плоскій мембрані 2, що забезпечує досить високу частоту власних коливань підвісу. Нижня обкладка конденсатора 5 через ізолюючу прокладку 6 з'єднана з мембраною 2, верхня обкладка через ізолюючу прокладку – з корпусом 3.

Щоб збільшити ємність і запобігти замиканню та пробоям, у зазор між обкладками конденсатора введено твердий діелектрик – тонку слюдяну прокладку 4. Під дією вібрації змінюється зазор між обкладками, а отже, і ємність конденсатора.

Позначимо: V – стала напруга на конденсаторі; B ; C – ємність конденсатора, Ф; δ – зазор між обкладками конденсатора, см; ω – колова частота вимірюваного прискорення, рад/с; ω_0 – власна колова частота датчика, рад/с. Тоді, якщо частота ω_0 набагато вища за ω , то, нехтуючи загасанням, можна записати

$$\Delta\delta = \frac{A_0 \sin \omega t}{\omega_0^2} = \frac{A}{\omega_0^2};$$

$$\Delta U = U \frac{\Delta C}{C} = U \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{U}{\delta} \frac{A}{\omega_0^2}.$$

У наведених виразах $A_0 \sin \omega t = A$ – прискорення. Описаним приладом можна вимірювати прискорення від кількох сантиметрів на секунду в квадраті ($\text{см}/\text{с}^2$) при частотах до 1000 Гц [1].

Оскільки між пластинами конденсатора застосовуються малі зазори, дуже часто потрібна стабілізація температурного режиму датчика, оскільки теплові деформації його деталей можуть призвести до зміни ємності такого самого порядку, як і вимірювані величини.

У цьому плані конструкція вимірювальних перетворювачів із змінною площею пластин раціональніша, оскільки зазначені перетворювачі характеризуються порівняно більшими змінами ємності, ніж ЄП із змінним зазором.

6.6. Контрольні питання до розділу 6

1. Ємнісні перетворювачі. Класифікація. Схеми включення. Переваги і недоліки.
2. Розрахунок ЄП.
3. Приклади застосування ЄП.
4. Призначення ЄП. Конструктивні різновиди ЄП. Застосування.
5. Принцип дії, чутливість ємнісного перетворювача.
6. Мостова схема включення ЄП, переваги і недоліки. Розрахунок ЄП.
7. Резонансна схема включення ЄП.

Розділ 7. ІНДУКТИВНІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

7.1. Застосування індуктивних і трансформаторних перетворювачів

Основний розробник серійних пристроїв на базі трансформаторних (ТрП) та індуктивних (ІП) перетворювачів – Бюро взаємозамінюваності в металообробній промисловості [59, 60, 68]. ТрП та ІП розробляються рядом підприємств і організацій різних міністерств [12, 13, 25, 35, 59, 60].

Основна область застосування ІП і ТрП – вимірювання лінійних і кутових переміщень, а також вироблення сигналів непогодження в слідкуючих пристроях.

7.2. Переваги ІП і ТрП

Індуктивні й трансформаторні перетворювачі мають високу точність вимірювань, дають змогу отримати уніфікований електричний сигнал, пропорційний до результатів вимірювань в аналоговій або цифровій формі; здатні автоматично керувати виконавчими об'єктами за результатами контролю, у тому числі безпосередньо в процесі виконання технологічної операції.

За рубежом трансформаторні та індуктивні вимірювальні перетворювачі посідають провідне місце у виробничих програмах інструментальних фірм як за номенклатурою, так і за обсягом [77].

Основні розробники і виробники зарубіжних трансформаторних та індуктивних пристроїв: Perthen, Mann, Feinpruf, Hahn & Kolb, Hofler, Schwanog (ФРН); Cary, Tesa (Швейцарія); Taylor Hobson, Herbert Metrology (Англія); ABCE (Швеція); Mitutoyo (Японія); Snheffield, Starret, Bendix, Herbert Controlls & Instruments (США) і т.ін.

Індуктивні і трансформаторні перетворювачі зарубіжних фірм, що випускаються в багатьох варіантах, використовуються для розв'язування різноманітних вимірювальних задач, наприклад, пристосовані для візуального відліку, з різною кількістю керуючих команд, для контролю похибки форми, з обчисленням статичних характеристик з результатів вимірювань тощо.

До складу ІП або ТрП входить окремий самозаписувач. За допомогою цих приладів можна виконувати обробку інформації в автоматизованих системах. Значна увага приділяється приладам керуючого контролю в процесі обробки, які випускають у кількох модифікаціях.

Системний підхід до розробки індуктивних і трансформаторних перетворювачів полягає в застосуванні модульного компонування приладів. Набір стандартних функціональних модулів дає змогу в разі об'єднання в стандартному корпусі розв'язувати найрізноманітніші вимірювальні задачі.

7.3. Недоліки й проблеми в галузі ІІІ і ТрІІ

Незважаючи на значне поширення ІІІ і ТрІІ у техніці виробничих вимірювань, в їх розробці переважає експериментальний підхід, за якого вибір конструктивних і схемних рішень ІІІ і ТрІІ здебільшого базується на досвіді розробника і даних експериментальних досліджень. В результаті конструктивні та схемні рішення пристроїв різних розробників (а іноді і одного розробника) істотно відрізняються один від одного навіть у разі близьких технічних і експлуатаційних характеристик пристроїв.

З огляду на це постають дві найбільш актуальні і такі, що підлягають першочерговому вирішенню в галузі ТрІІ та ІІІ, проблеми:

– *перша* – здійснювати системний підхід до проектування ІІІ та ТрІІ, щоб забезпечити задані метрологічні характеристики останніх. Особливу увагу при цьому слід приділити теорії та розрахунку ТрІІ переміщень, оскільки досі це найменш вивчене питання;

– *друга* – вирішувати питання оптимізації конструкції ІІІ та ТрІІ під час їх розробки. Висновки електромагнітної теорії мереж в даному випадку не враховують метрологічної суті ІІІ та ТрІІ і не встановлюють в очевидній формі їх конструктивних та метрологічних характеристик. Для ТрІІ це дає змогу лише наближено розраховувати градувальні характеристики, якщо відома його конструкція.

Область застосування ІІІ та ТрІІ: електричні манометри, дифманометри, рівнеміри, електричні ваги; пристрої для вимірювання розмірів оброблюваних деталей.

7.4. Індуктивні перетворювачі

7.4.1. Загальна характеристика ІІІ

Для вимірювання невеликих лінійних і кутових переміщень широко використовують ІІІ, що являє собою котушку самоіндукції із залізним осердям та якорем, відокремленим від осердя повітряним зазором. Індуктивність котушки змінюють, змінюючи повітряний зазор у магнітному колі або переміщуючи осердя відносно котушки. Коли амплітуда і частота напруги живлення, що подається на котушку, незмінні, то між силою струму в котушці та переміщенням рухомої час-

тини елемента існує взаємно однозначна залежність, у зв'язку з чим за силою струму можна судити про величину переміщення.

Індуктивні перетворювачі досить прості в експлуатації й надійні, оскільки не містять електричних контактів, що піддаються корозії, ерозії та стиранню.

На рис. 7.1 зображено схеми ІІ. Його основні частини: котушка самоіндукції 1, з'єднана послідовно з навантаженням (наприклад, вимірювальним приладом та джерелом змінної напруги живлення); осердя 2 та якорь 3, їх набирають у пакет з тонких пластин феромагнітного матеріалу (трансформаторної сталі 34А, пермалою та ін.). Схеми ІІ з прямолінійним переміщенням якоря (рис. 7.1, а, б) застосовують для вимірювання малих переміщень – від часток мікрона до кількох міліметрів. Для вимірювання великих переміщень (до 30 мм) застосовують ІІ з рухомих осердям (рис. 7.1, в). З введенням осердя всередину котушки індуктивність її змінюється приблизно пропорційно до маси металу, введеного всередину котушки. Чутливий елемент, зображений на рис. 7.1, г, з осердям конічної форми призначений для вимірювання переміщень порядку кількох сантиметрів.

Індуктивність L , Гн, котушки з числом витків w найпростішого ІІ (рис. 7.1, а)

$$L = \frac{w\Phi}{I} \cdot 10^{-8},$$

де Φ – магнітний потік, мкс [Вб]; I – струм у котушці, А.

В системі ІС

$$L = \frac{w\Phi}{I}. \quad (7.1)$$

Магнітний потік, Вб,

$$\Phi = \frac{I w}{R_M} = \frac{I w}{R_{ж} + R_{п}}, \quad (7.2)$$

де R_M – магнітний опір, що складається із опору $R_{ж}$ магнітопроводу (осердя та якоря) і опору $R_{п}$ двох повітряних зазорів;

$$R_{п} = \frac{2\delta}{\mu_0 S_{п}}; \quad (7.3)$$

δ – довжина повітряного зазору, м; μ_0 – магнітна стала (магнітна проникність вільного простору), що характеризує магнітне поле у вакуумі

і дорівнює $2\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $S_{\text{п}}$ – площа поперечного перерізу повітряного зазору, м.

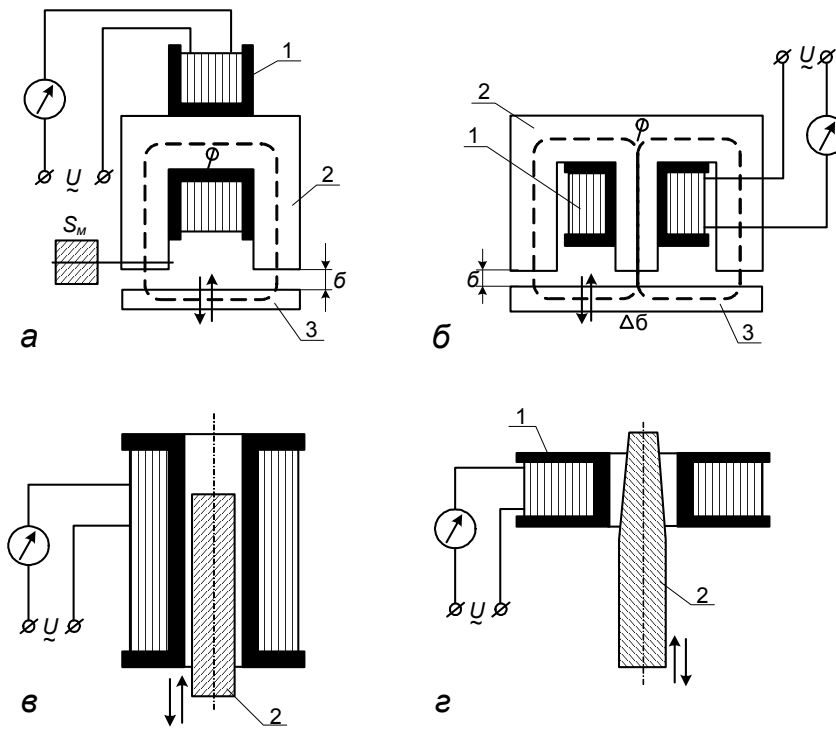


Рис. 7.1. Схеми індуктивних перетворювачів:
 а – з П-подібним осердям; б – з Ш-подібним осердям;
 в – соленоїдного типу; г – з осердям конічної форми

Абсолютна магнітна проникність, що характеризує середовище (матеріал), в яке проникає магнітне поле, Гн/м:

$$\mu_0 = \mu \mu_0, \quad (7.4)$$

де μ – відносна магнітна проникність (величина безрозмірна), яка показує, у скільки разів магнітна проникність у даному середовищі більша за магнітну проникність у вакуумі. Магнітний опір осердя та якоря

$$R_{ж} = \frac{l_1}{\mu_{a1}S_1} + \frac{l_2}{\mu_{a2}S_2}, \quad (7.5)$$

де l_1 – довжина шляху магнітного потоку в осерді, м; μ_{a1} – абсолютна магнітна проникність для матеріалу осердя, якщо магнітна індукція в осерді B_{m1} ; S_1 – площа поперечного перерізу осердя, м²; l_2 – довжина шляху магнітного потоку в якорі, м; μ_{a2} – магнітна проникність для матеріалу якоря, коли магнітна індукція в якорі B_{m2} ; S_2 – площа поперечного перерізу якоря, м².

Значення μ_{a1} і μ_{a2} знаходять за допомогою графіка або таблиць $B = f(H)$ за формулою

$$\mu_a = \frac{B}{H}, \quad (7.6)$$

де B – індукція, Тл; H – напруженість, А/м.

Графік кривих індукції електротехнічної сталі показано на рис. 7.2, де 1 – Э41, 2 – Э44, товщина 0,2 мм; 3 – Э310, товщина 0,35 мм; 4 – Э310, товщина 0,08 мм.

Підставляючи Φ та $R_{п}$ в формулу (7.1), дістанемо

$$L = \frac{w^2}{R_{ж} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_{п}}},$$

і струм у котушці

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = U / \sqrt{R^2 + \omega^2 \left(\frac{w^2}{R_{ж} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_{п}}} \right)}, \quad (7.7)$$

тобто при незмінних значеннях активного опору R обмотки, частоти ω і напруги U джерела живлення струм у котушці залежатиме від довжини повітряного зазору, а при незмінній довжині зазору – від площі його перерізу.

Звичайно індуктивний перетворювач проектують з ненасиченим магнітопроводом, причому повітряний зазор вибирають у межах 0,1...0,5 мм. За цих умов $R_{ж} \ll 2\delta/(\mu_0 S_{п})$; активний опір R також значно менший за індуктивний $R \ll \omega L$.

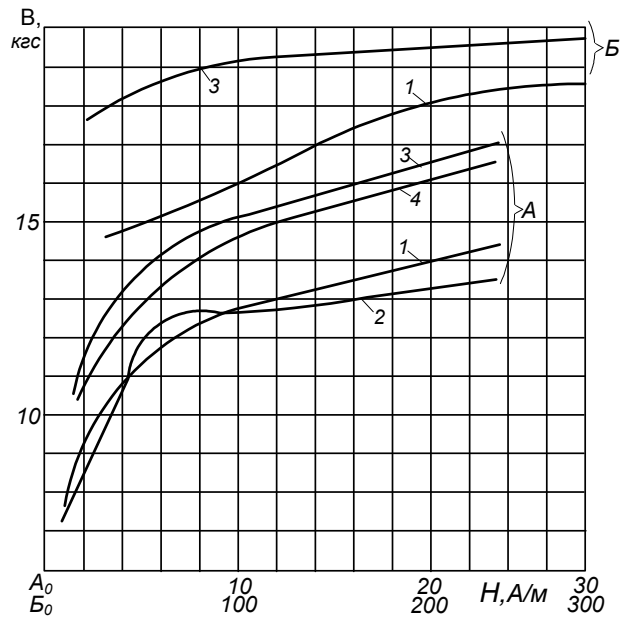


Рис. 7.2. Графіки кривих індукції електротехнічної сталі

Знехтувавши значеннями R і $R_{ж}$, отримуємо

$$L \approx \frac{\omega^2 S_{II}}{2\delta} \mu_0. \quad (7.8)$$

На рис. 7.3, а зображено залежність індуктивності від довжини повітряного зазору, а, отже, і від переміщення якоря. Щоб забезпечити лінійність характеристики, робочий хід якоря беруть невеликим порівняно з початковим зазором: δ_0 ($\Delta\delta \ll \delta_0$). Тоді робоча ділянка гіперболічної характеристики ІІ буде близькою до прямолінійної. Силу струму в котушці при $R_{ж} \ll R_{II}$ і $R \ll \omega L$ можна визначити за наближеною формулою

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U^2}{\omega w^2 S_{II} \mu_0} \delta. \quad (7.9)$$

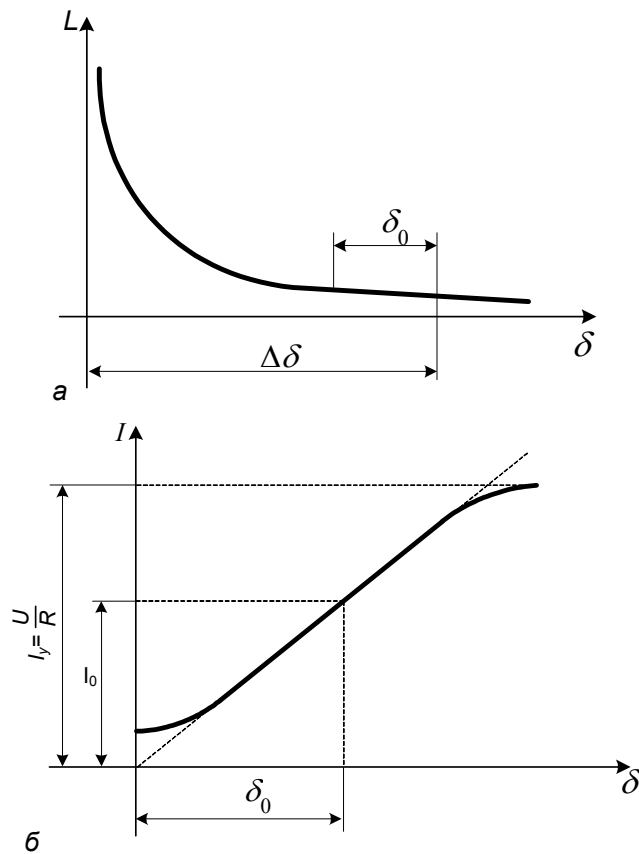


Рис. 7.3. Залежність індуктивності від довжини зазору (а) і струму від довжини зазору (б) для ПІ

Отже, можна вважати, що характеристика ПІ, тобто залежність струму в котушці від повітряного зазору переміщення якоря лінійна. На графіку (рис. 7.3, б) цю характеристику зображено пунктиром. Реальна характеристика відрізняється від лінійної наявністю нелінійності за рахунок початкового струму при нульовому повітряному зазорі, а також наближенням струму до усталеного значення $I_y = U/R$, якщо зазори великі і активний опір стає порівнянним з індуктивним. Істотний недолік даного ПІ полягає в тому, що на якір діють великі магнітні сили, які намагаються притягнути якір до осердя магнітопроводу.

Ці сили збільшуються із зменшенням зазору: вони пропорційні до квадрата ампер-витків котушки. Тому, щоб втримати якір у відтягнутому стані, потрібно прикласти значні зусилля, які перешкоджатимуть переміщенню якоря під час дії зовнішніх сил, а коли ці сили малі, якір взагалі не переміщуватиметься. До недоліків даного ПП слід також віднести нелінійність його характеристики, оскільки насправді $R_{ж} \neq 0$ і $R \neq 0$.

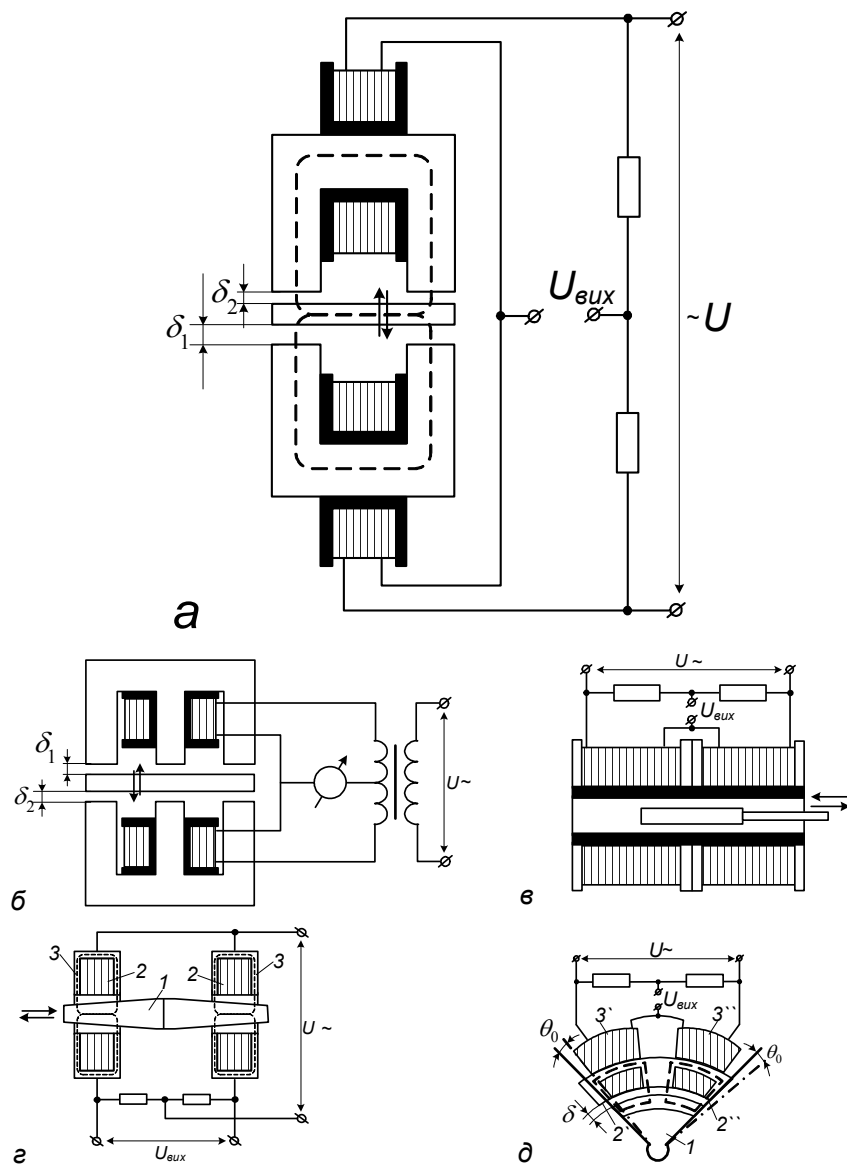
7.4.2. Диференціальні індуктивні перетворювачі

Найбільшого поширення набули диференціальні ПП, в яких якір розміщений в просторі між двома осердями, закріпленими на спільній основі (рис. 7.4). Під час переміщення якоря від нейтрального положення індуктивність L_1 однієї котушки зменшується на ΔL , а індуктивність L_2 другої котушки збільшується:

$$L_2 = L + \Delta L; \quad L_1 = L - \Delta L. \quad (7.10)$$

Котушки звичайно вмикають у сусідні плечі мостової схеми. Чутливість диференціального ПП приблизно вдвічі вища за чутливість ПП, розглянутого в підрозділі 7.4.1. На якір диференціального ПП також може діяти сила притягання до осердя, пов'язана з магнітною дією струму, що протікає в котушках ПП. Але, оскільки сили притягання до одного і другого осердя протилежні за напрямом, то результуюча сила, що діє на якір, дорівнює різниці сил притягання і буде дуже малою або дорівнюватиме нулю в разі нейтрального положення якоря. Коли за умовами використання потрібно, щоб ця сила була якомога меншою і нею можна було знехтувати, то слід ПП виконувати малим за розмірами і масою, вибирати малу силу струму живлення і застосовувати фазочутливий підсилювач для підсилення вихідної напруги до рівня, який дає змогу виконувати вимірювання.

Перевагою диференціального ПП є також можливість отримати лінійну характеристику на порівняно великому діапазоні переміщення якоря, оскільки нелінійності характеристик двох котушок взаємно компенсуються.



с. 7.4. Диференціальні ПП: а – з П-подібним осердям;
 б – з Ш-подібним осердям; в – соленоїдного типу;
 г – з осердям конічної форми; д – з поворотним якорем

Ри

Компенсація впливу температури, зміна якої спричинює зміну опору з'єднувальних проводів, у диференціальних ІІІ також спрощується. Фаза напруги в діагоналі мосту, двома плечима якого є котушки диференціального ІІІ, залежить від напрямку переміщення якоря. В ІІІ типу, зображеного на рис. 7.4, а, б, вибирають повітряний зазор 0,2...1,0 мм. Повітряний зазор на один бік (δ_0) має бути приблизно вдвічі більший, ніж максимальний хід якоря. Частоту напруги живлення вибирають у діапазоні 100... 1000 Гц. У разі використання струму частотою понад 3000...5000 Гц різко зростають втрати в сталі на перемагнічування і реактивний опір обмотки. На високих частотах доцільно застосовувати феритові осердя.

На рис. 7.4, а, б показано схеми диференціальних ІІІ з ІІ-подібним і ІІІ-подібним осердям. На рис. 7.4, в зображено схему ІІІ соленоїдно-го типу з рухомим осердям. Дві котушки встановлено на товстостінній трубці, всередині якої вміщують феромагнітне осердя. Переміщення осердя, спричинене зміною вимірюваної величини (наприклад, зміною рівня рідини в резервуарі), збільшує індуктивність однієї і зменшує індуктивність другої котушки. Через це змінюється струм у діагоналі мосту змінного струму, двома плечима якого є котушки ІІІ.

На рис. 7.4, г показано схему диференціального ІІІ із осердям 1 конічної форми. Котушки 2 вміщено у феромагнітний кожух 3. Магнітний потік котушки замикається так, як показано на рис. 7.4 пунктиром.

Коли якір зміщується вздовж осі симетрії (напрявні якоря на рис. 7.4 не показані), повітряні зазори між якорем і котушками змінюються, збільшуючись у одній з них і зменшуючись у другій, що спричинює появу сигналу на виході. Якщо, наприклад, на якір такого ІІІ передається переміщення тяги керування рулем літака, то сигнал на виході ІІІ залежатиме від переміщення тяги, тобто від кута відхилення руля.

На рис. 7.4, д зображено диференціальний ІІІ з поворотним якорем, призначений для вимірювання кутових переміщень. Якір 1 рухається перпендикулярно до довжини δ повітряного зазору, яка залишається при цьому незмінною, а перекриваєма якорем площадка полюса змінюється. У нейтральному положенні якоря індуктивності обох котушок 3' і 3'' однакові, оскільки площі полюсів 2' і 2'', що перекриваються якорем, у правій і лівій половинах елементів рівні між собою.

При повороті якоря, наприклад за годинниковою стрілкою, перекриваєма якорем площа полюса 2' зменшиться, що спричинює збільшення магнітного опору потоку обмотки 3', а площа 2'', перекриваєма якорем, збільшується, через що магнітний опір потоку обмотки 3'' зменшується. В результаті індуктивність обмотки 3' зростає, а обмотки 3'' – зменшиться, що змінить величину вихідного сигналу (див. формулу (2.7)).

7.5. Трансформаторні перетворювачі

7.5.1. Загальна характеристика ТрП

У трансформаторних перетворювачах зміна положення рухомого органу, який сприймає вимірюване переміщення, спричиняє зміну взаємної індукції (коефіцієнта взаємоіндукції) між двома системами обмоток. До однієї з них підводиться змінна напруга живлення U , а з іншої знімається індукована в ній напруга $U_{\text{вих}}$, залежна від коефіцієнта взаємоіндукції i , зрештою, від вимірюваного переміщення.

У ТрП, показаному на рис. 7.5, а, змінна напруга U підводиться до котушок 1, які називають первинними, або обмотками збудження. Напруга $U_{\text{вих}}$, що залежить від переміщення якоря 4 відносно осердя 3, знімається з котушок 2, які називаються вторинними, або сигнальними. При середньому положенні якоря напруга $U_{\text{вих}}=0$.

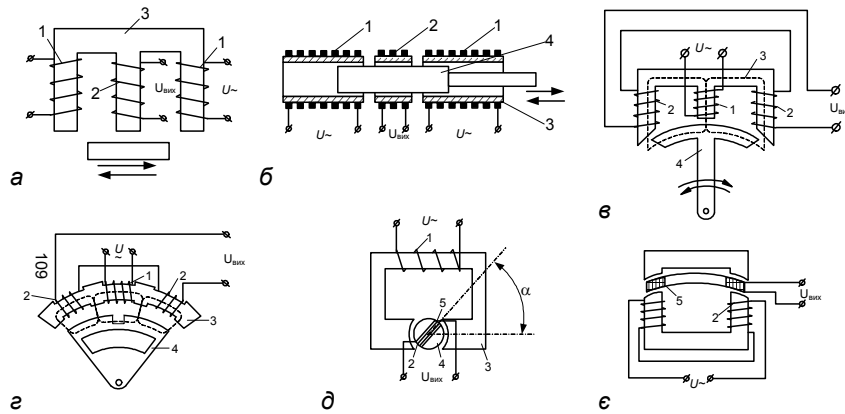


Рис. 7.5. Трансформаторні перетворювачі:

- а – з двома обмотками збудження; б – соленоїдного типу;
- в – з одною обмоткою збудження і двома секціями вихідної обмотки;
- г – з кутовим переміщенням якоря; д – з обертовим ротором; е – з рухомою рамкою

Насправді при середньому положенні якоря схема повністю не зрівноважена і є залишкова напруга розбалансу $U_{\text{вих}} \neq 0$, яка складається з основної та вищих гармонік. Величина основної гармоніки залежить від ступеня ідентичності обмоточних даних котушки 1, несиметричності магнітопроводу, яка практично завжди спостерігається через неточність його виготовлення, та неоднорідності магнітних властивостей його матеріалу. При переміщенні якоря 4 симетрія зазорів порушується, і в котушці 2 виникає напруга, пропорційна до переміщення якоря.

На рис. 7.5, б показано схему ТрП, який складається з трьох котушок і рухомого осердя, яке сприймає вимірюване переміщення, спричинене, наприклад, вібрацією, прискоренням тощо. За відсутності вібрації осердя перебуватиме в середньому положенні і струму в котушці не буде. При переміщенні осердя в котушці 2 виникає напруга $U_{\text{вих}}$ залежна від величини і напрямку цього переміщення. Котушки 1 і 2 можна поміняти місцями: живлення підводити до котушки 2, а сумарну напругу знімати з котушок 1, ввімкнених зустрічно.

На рис. 7.5, в зображено схему, в якій обмотки ввімкнені саме таким чином. За нейтрального положення якоря напруга $U_{\text{вих}}$ дорівнює нулю. При зміщенні якоря взаємодія обмоток 1 і 2 стають неоднаковими і на виході виникає напруга $U_{\text{вих}}$, фаза та значення якої залежать від напрямку зміщення якоря. За такою самою схемою працює і ТрП, показаний на рис. 7.5, г. ТрП, побудовані за принциповими схемами рис. 7.5, в, г, набули значного поширення в сучасних гіроскопічних авіаційних приладах для перетворення в електричний сигнал невеликих кутових переміщень порядку кількох хвилин і більше. Амплітуда вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ дорівнює різниці ЕРС, індукованих у обмотці 2, а фаза напруги залежить від напрямку повороту якоря. Якщо цю напругу подати на вихід фазочутливої системи, то магнітоелектричний прилад, увімкнений у діагональ мосту, показуватиме величину і напрям зміщення якоря.

На рис. 7.5, д зображена схема ТрП з поворотною рамкою, розміщеною у стабільному радіальному полі, що створюється обмоткою 1 в зазорі між полюсами та циліндричним осердям 4. За однакової ширини повітряного зазору потік, що пронизує рамку, практично пропор-

ційний до кута α і ТрП має лінійну характеристику в широкому діапазоні зміни вхідної величини α .

На рис. 7.5, є показано інший варіант конструкції ТрП з поворотною рамкою. До котушок збудження 2 підводиться змінний струм. Напряга $U_{\text{вих}}$ дорівнює різниці ЕРС, індукованих у сторонах рамки 5, які розміщені в робочих зазорах. За нейтрального положення рамки $U_{\text{вих}} = 0$. При повороті рамки від нейтрального положення фаза і значення $U_{\text{вих}}$ залежать від напрямку та кута повороту рамки. Велика перевага даного ТрП порівняно з ТрП, зображеним на рис. 7.5, в, полягає в тому, що в ньому не створюється реактивний момент; використаний, наприклад, у гіроскопічних приладах для вимірювання кутових переміщень, цей ТрП не буде, як це робить електромагніт (рис. 7.5, в), чинити зворотний вплив на рамки кардана.

7.5.2. Мікросин

Останнім часом набув поширення ТрП – мікросин. Він дає змогу з високою точністю вимірювати кутові переміщення, надійний у роботі, має дуже малу вагу і невеликі габаритні розміри [54]. Схему мікросина зображено на рис. 7.6.

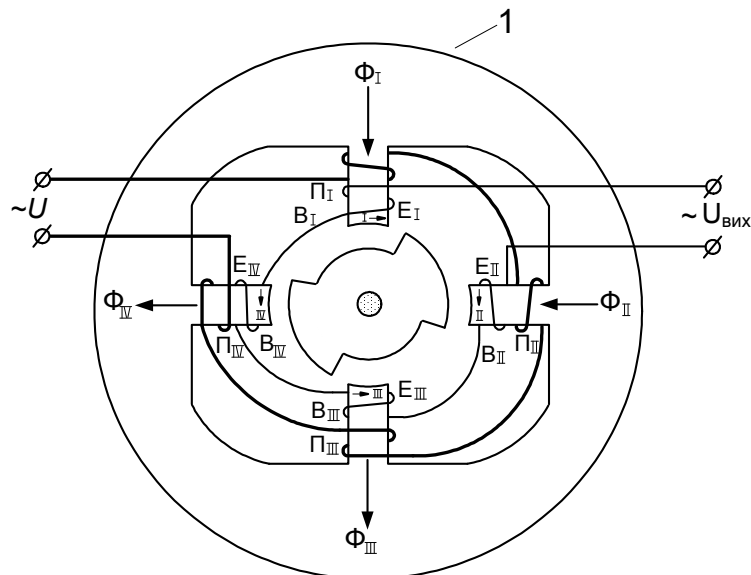


Рис. 7.6. Мікросин

Первинна обмотка перетворювача складається з чотирьох послідовно з'єднаних котушок $\Pi_I, \Pi_{II}, \Pi_{III}$ і Π_{IV} , кожна з яких встановлена на відповідному полюсі статора 1. На тих самих полюсах розміщено по одній котушці V_I, V_{II}, V_{III} і V_{IV} . Ці котушки утворюють вторинну обмотку мікросина. Первинні котушки створюють у полюсах магнітні потоки $\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}$ і Φ_{IV} , напрями яких у кожній парі полюсів (I і III, II і IV) збігаються. На рис. 7.6 стрілками показано миттєві напрями цих потоків. Напряга $U_{вих}$ вихідного сигналу дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС E_I, E_{II}, E_{III} і E_{IV} , які наводяться в котушках вторинної обмотки. При цьому ЕРС E_I, E_{III} збігаються за фазою, а ЕРС E_{II}, E_{IV} напрямлені назустріч ЕРС E_I, E_{III} .

$$U_{вих} = E_I - E_{II} + E_{III} - E_{IV}.$$

Положення ротора 2, при якому він порівну перекриває різнойменні полюси статора, називають нейтральним, або нульовим. У цьому разі напруга $U_{вих}=0$. При відхиленні ротора від нульового положення, наприклад за годинниковою стрілкою, перекривання ним полюсів II і IV збільшиться, а перекривання полюсів I і III зменшиться. Через це відбудеться перерозподіл потоків, створюваних котушками первинної обмотки, у результаті чого ЕРС E_{II} і E_{IV} , індуковані в котушках II і IV, зростуть, а ЕРС E_I і E_{III} , індуковані в котушках I і III, зменшаться порівняно з їх значеннями, що відповідають нульовому положенню ротора. Тому на виході вторинної обмотки виникне напруга $U_{вих}$, що має фазу ЕРС, індукованої в котушках E_{II} і E_{IV} . Значення цієї напруги буде пропорційне до кута α відхилення ротора від свого нульового положення. Пропорційну залежність забезпечити тим легше, чим менший кут повороту ротора. За малого кута повороту, крім того, практично зводяться до нуля моменти, що накладаються на ротор внаслідок взаємодії його з магнітними полями котушок. Це також забезпечує високу точність показань мікросина.

Мікросин використовують також як чутливий елемент, що перетворює зміну струму в зміну обертаючого моменту (датчик моменту). У цьому разі до обох обмоток мікросина (первинної та вторинної) підводиться напруга (постійна або змінна). Нехай на вхід вторинної обмотки подається напруга, яка має таку саму полярність (коли мікросин живиться постійним струмом) або фазу (коли мікросин живиться змінним струмом), щоб, наприклад, вторинні котушки V_{II} і V_{IV} створювали потоки, які збігаються за напрямом з потоками, створюваними первинними котушками Π_{II} і Π_{IV} і таким чином підсилювали пото-

ки полюсів II і IV. При цьому потоки котушок B_1 і B_{III} будуть спрямовані протилежно потокам котушок P_1 і P_{III} і послаблять останні. У результаті виникне момент, який намагається повернути ротор у бік сильнішого магнітного поля, тобто ліворуч. Величина цього моменту буде пропорційна до добутку струмів I_1 і I_2 , які живлять первинну (збудження) та вторинну обмотки. Оскільки $I_1 = \text{const}$, момент ротора буде пропорційний лише до сили струму I_2 , що підводиться до вторинної обмотки. При зміні фази (або полярності) U на протилежну посилюються поля полюсів I і III, а поля полюсів II і IV послаблюються, що спричиняє зміну знака моменту ротора.

7.6. Розрахунок магнітного кола

Контур, по якому замикається магнітний потік, називають магнітним колом. Розрахунок III, ТрП, електромагнітних реле, різних електровимірювальних приладів пов'язаний з розрахунками магнітного кола. Задача розрахунку магнітного кола полягає в тому, щоб обчислити магнітні потоки в різних частинах магнітної системи, які зумовлені наявністю магніторушійної сили F , що створюється струмом котушки або постійним магнітом.

У деяких випадках доводиться розв'язувати й обернену задачу: визначити магніторушійну силу котушки, потрібну для створення в системі магнітних потоків заданої величини. В основу розрахунку магнітного кола покладено закони, які за формою аналогічні законам електричного кола. До них належать закони Ома для магнітних кіл, перший та другий закони Кірхгофа. Завдяки аналогії між законами для електричних і магнітних кіл прийоми розрахунку магнітних кіл повністю збігаються з прийомами розрахунку електричних кіл, мета якого – визначити струм у кожній гілці кола.

Розраховуючи складні розгалужені магнітопроводи, складають еквівалентну схему, або схему заміщення магнітного кола, зображення якої аналогічно схемам електричного кола. Джерелу ЕРС та електричному опору кола в схемі заміщення магнітного кола відповідає джерело магніторушійної сили F і магнітний опір R_m . Величини і напрями потоків магнітного кола відповідають величинам і напрямкам струмів електричного кола.

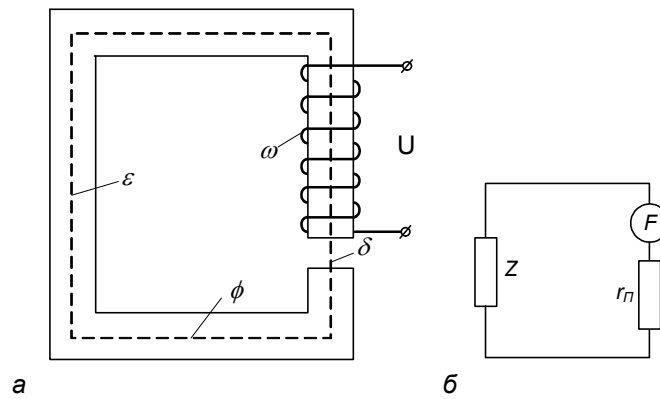


Рис. 7.7. Схема нерозгалуженого магнітного кола (а) і еквівалентна схема заміщення такого кола (б)

Розглянемо приклади побудови схем заміщення магнітного кола.

Приклад 7.1. На рис. 7.7, а зображено схему нерозгалуженого магнітного кола з повітряним зазором. Магнітний потік для такого кола, якщо знехтувати його розсіянням, буде (див. формули (7.2), (7.5)) дорівнювати, Вб:

$$\Phi = \frac{I w}{R_{ж} + R_{п}} = \frac{I w}{\frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{\delta}{\mu_0 S_{п}}}. \quad (7.11)$$

На рис. 7.7, б показано схему заміщення такого кола. В процесі розрахунку складних розгалужених магнітних кіл за допомогою проміжних перетворень схему заміщення зрештою приводять до вигляду, показаного на рис. 7.7. б.

Приклад 7.2. На рис. 7.8, а показано схему диференціального трансформаторного перетворювача і на рис. 7.8, б – схему заміщення його магнітного кола. Подібний елемент застосовують, наприклад, у датчику вібрацій. Магнітне коло ІІ є розгалуженим і містить кілька повітряних проміжків, опори яких на схемі зміщення позначені $r_{п}$; опори магнітопроводу осердя та якоря позначені z , опори потокам розсіяння (витікання) – $r_{в}$.

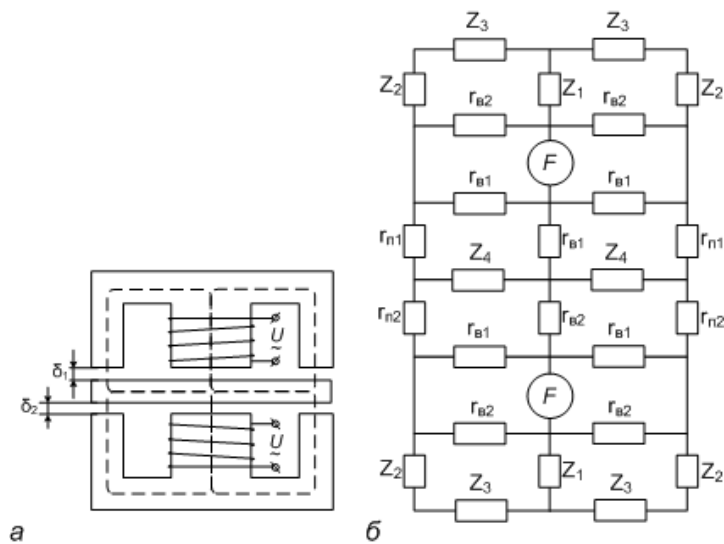


Рис. 7.8. Схема диференціального чутливого елемента (а) і схема заміщення його магнітного кола (б)

Приклад 7.3. На рис. 7.9, а, б зображено схему трансформаторного перетворювача і спрощену схему розміщення магнітного кола, в якому враховано лише провідності G_I , G_{II} , G_{III} повітряних проміжків між полюсами (кінцями) стрижнів I, II, III осердя 3 та якоря 4.

За схемами заміщення, користуючись законами Ома та Кірхгофа для магнітних кіл, можна скласти ряд рівнянь, за якими визначають величини потоків у різних частинах магнітної системи при заданій магніторушійній силі котушки.

Розв'язують також обернену задачу – визначають потрібну магніторушійну силу котушки при заданих значеннях робочих потоків у зазорах. Розв'язування задачі дещо ускладнюється через те, що значення магнітного опору магнітопроводу не стале, а закон його зміни – нелінійний. Тому для повного розв'язання задачі доводиться додатково використовувати криві намагнічування матеріалу.

Магнітне коло на змінному струмі розраховують також за допомогою схеми заміщення, але при цьому ділянки магнітопроводу замінюють комплексними опорами.

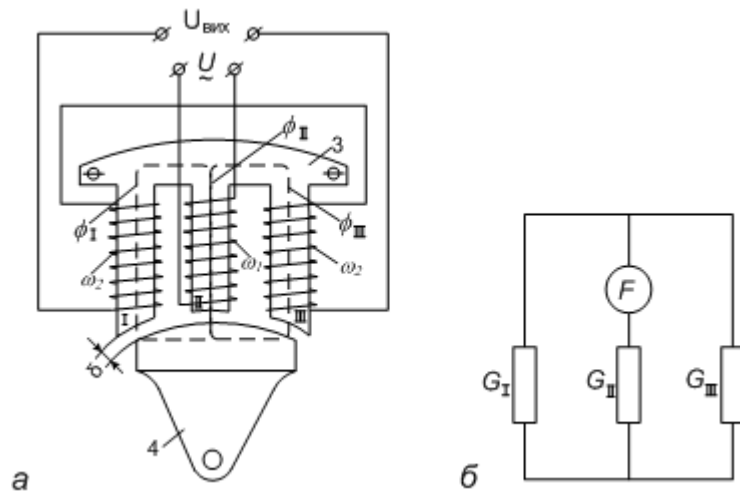


Рис. 7.9. Схема ТрП (а) і спрощена схема заміщення магнітного кола (б)

Потоки і напруги розглядаються як комплексні величини. Тому схема заміщення магнітного кола розраховується так само, як схема електричного кола з комплексними параметрами.

7.7. Магнітна провідність повітряних ділянок магнітного кола

Часто магнітні кола з достатньою для практичних цілей точністю можна розрахувати, нехтуючи магнітним опором матеріалу магнітопроводу, оскільки $R_{ж} \ll R_{п}$. В схемах заміщення в такому разі опори Z , відсутні. Для найпростішого випадку рівномірного повітряного зазору між двома паралельними площинами (рис. 7.10, а) всю провідність, коли $a/\delta > 10$ і $b/\delta > 10$, звичайно визначають за наближеною формулою

$$G_{п} = (ab/\delta)\mu_0. \tag{7.12}$$

При значеннях a/δ і b/δ , менших від вказаного, істотно впливають на магнітну провідність, спричиняючи її зменшення, потоки розсіяння Φ_p , які замикаються в повітрі між бічними поверхнями полюсів магнітопроводу. В цьому разі поле між паралельними полюсами (рис. 7.10, б) можна вважати таким, що складається з двох частин: однорідного поля 1 і поля 2, яке визначається пучністю ліній індукції. Потік 2 називають крайовим потоком, або потоком розсіяння.

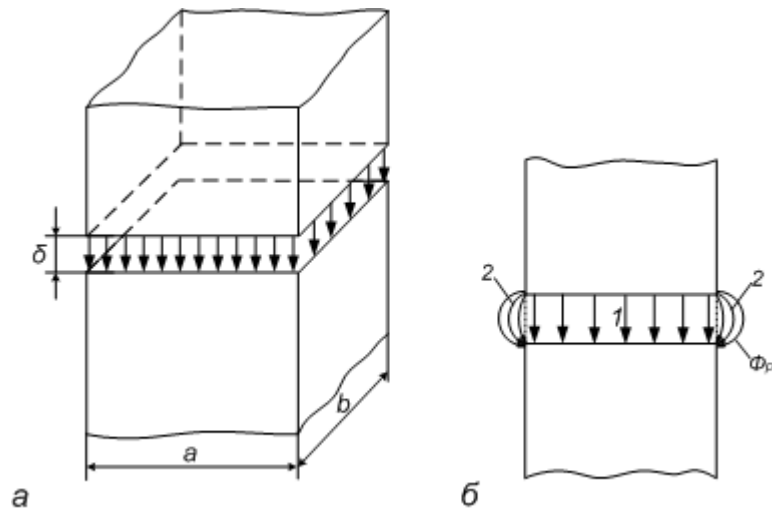


Рис. 7.10. До розрахунку магнітної провідності повітряної ділянки магнітного кола для рівномірного повітряного зазору (а); поле між паралельними полюсами (б)

7.8. Графічний метод визначення провідностей

У разі складної конфігурації повітряних ділянок магнітного кола та потреби розрахувати провідність з великою точністю звичайно застосовують графічний метод визначення провідності. Покажемо на прикладі перетворювача, зображеного на рис. 7.9, а, побудову картини поля біля кінця (полюса) одного з його стрижнів та якоря. Skorистаємося методикою побудови картини поля, викладеною, в працях А.Я. Буйлова, Б.С. Сотскова, М.А. Бібікова, А.Г. Сливинської (Буйлов А.Я. Основы электротехники. – М.: Госэнергоиздат, 1946; Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.: Госэнергоиздат, 1956; Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.; Госэнергоиздат, 1960).

Оскільки поворот якоря відбувається в площині креслення, то поле є плоско-паралельним. Поверхні полюсів, що обмежують повітряні проміжки, вважаються поверхнями однакового магнітного потенціалу, або екіпотенціальними поверхнями.

Для випадку плоско-паралельного поля (рис. 7.11) скористаємося поняттям еквіпотенціальних ліній (у даному разі лінії 1-1, 1-2, 3-3, 3-4, 3-5).

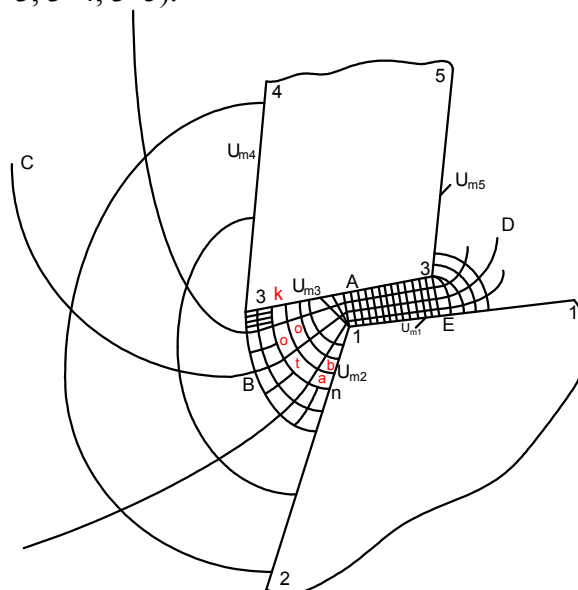


Рис. 7.11. Картина плоско-паралельного поля

Нехай цим еквіпотенціальним лініям відповідають магнітні потенціали u_{m1} , u_{m2} , u_{m3} , u_{m4} , u_{m5} . Поле між ділянками полюсів осердя та якоря, що взаємно перекривають одна одну, однорідне, магнітні силові лінії в ньому паралельні. Поділимо це поле трьома еквіпотенціальними лініями на чотири рівні частини. Проведемо на око середню еквіпотенціальну лінію AB , що поділяє різницю потенціалів $\Delta u = u_{m3} - u_{m2}$ навпіл. З обох боків лінії AB будемо елементарні криволінійні чотирикутники так, щоб силові лінії, які їх обмежують, виходили під прямим кутом до поверхні полюсів, а в утворених між еквіпотенціальними та силовими лініями криволінійних чотирикутників середня ширина дорівнювала середній довжині, тобто $a=b$, $a'=b'$ і т. д. Коли силові лінії, що обмежують сторони відповідних чотирикутників (наприклад, kl і ln), не є продовженням одна одної, то це означає, що середня еквіпотенціальна лінія була проведена неточно і її потрібно змі-

стити у відповідному напрямі. Щоб уточнити картину поля, особливо біля країв полюсів, слід провести проміжні еквіпотенціальні лінії, які поділяють різницю потенціалів ΔU на $1/4$, $1/8$, $1/16$ і т.п. частки.

На рис. 7.11 для уточнення картини поля біля лівого краю полюса 1 показано три еквіпотенціальні та силові лінії, які обмежують елементарні «квадрати», а також середні еквіпотенціальні лінії BC і ED , проведені відповідно між еквіпотенціальними лініями з потенціалами u_{m2} , u_{m4} , u_{m3} , u_{m5} . Там же показано розміщення силових ліній. Якщо поле складається з m паралельних силових трубок і в кожній з них міститься n елементарних «квадратів», то при товщині поля h , m , повна геометрична провідність, m , дорівнює:

$$G = \frac{m}{n} h. \quad (7.13)$$

Магнітну провідність G у повітрі можна далі обчислити за формулою, Гн:

$$G_B = \mu G, \quad (7.14)$$

де $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Один з поширених методів визначення магнітної провідності повітряного зазору – метод розбиття поля на прості фігури, суть якого полягає ось у чому. Все поле в повітряному зазорі між полюсами розбивають трубками індукції на ряд потоків, причому так, щоб ці трубки індукції мали форму простих геометричних фігур, наприклад циліндрів, півциліндрів тощо. Провідність кожної трубки визначають як відношення середнього перерізу трубки до середньої її довжини. Повна провідність дорівнює сумі провідностей окремих трубок, якщо прикладена до кінців різниця магнітних потенціалів лишається для всіх трубок однаковою. На рис. 7.12 показано приклад такого розбиття. Розглядається поле між двома полюсами A та B , причому розміри полюса B (у плані) в кілька разів більші від розмірів полюса A . Все поле розбивають на такі трубки індукції:

2 – прямокутна призма з розмірами a , b ;

δ – відповідає повітряному зазору;

4 – чверть кругового циліндра з радіусом, що дорівнює δ .

6 – чверть порожнистого кругового циліндра з внутрішнім радіусом, що дорівнює δ , і зовнішнім, що дорівнює $\delta+m$, де m – деяка довільна величина, взята, звичайно, за дослідними даними, $m=(1\dots 2)\delta$.

8 – половина кульового квадранта;
 10 – половина квадранта кульової оболонки.

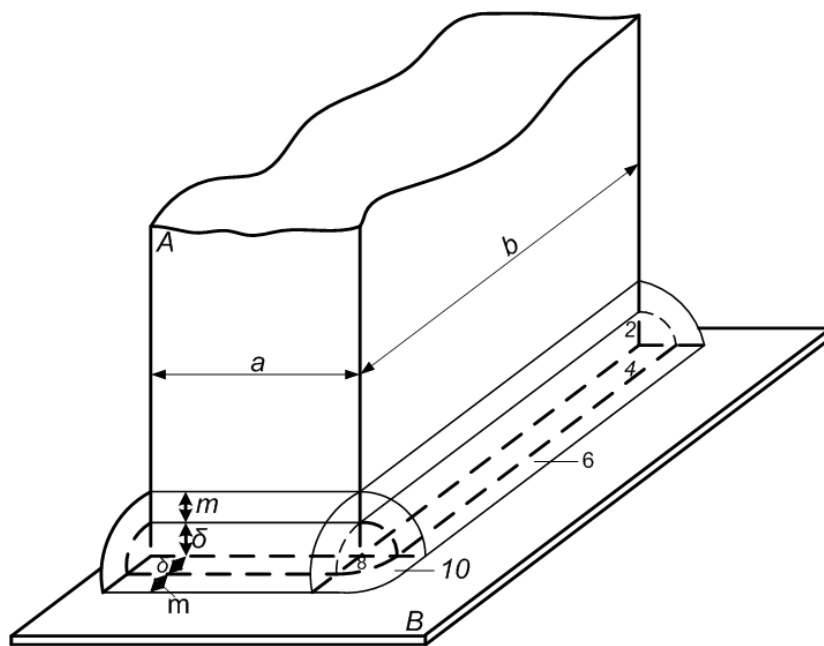


Рис. 7.12. Приклад розбиття до визначення провідності

В табл. 7.1 наведено формули для обчислення магнітних провідностей повітряних шляхів різної конфігурації. Номери перелічених на рис. 7.12 форм відповідають позначенням табл. 7.1.

Приклад 7.4. Визначити ефективне значення ЕРС $U_{\text{вих}}$ на затискачах вторинної (сигнальної) обмотки ω_2 трансформаторного перетворювача, зображеного на рис. 7.9, за такими даними: напруга змінного струму $U=36$ В при частоті 400 Гц; розміри осердя та якоря відповідають даним рис. 7.13; матеріал осердя та якоря – сталь Э4АА; число витків первинної обмотки (обмотки збудження) $w_1=1500$; опір обмотки $w_1 R_1=250$ Ом; число витків вторинної (сигнальної) обмотки $w_2=1200$; робочий кут повороту якоря від середнього положення дорівнює +5.

Розв'язання. 1. Визначимо магнітні провідності повітряного проміжку, враховуючи і не враховуючи випучування силових ліній біля полюсів (кінців) стержнів осердя. Магнітними опорами осердя та якоря нехтуємо через мале значення цих опорів порівняно з магнітним опором повітряного проміжку. На рис. 7.11 було показано картини поля біля одного з полюсів такого проміжку. Для спрощення розрахунку побудуємо біля полюсів наближену картину поля, складеного з трубок 1–12 простої геометричної форми (рис. 7.13, а).

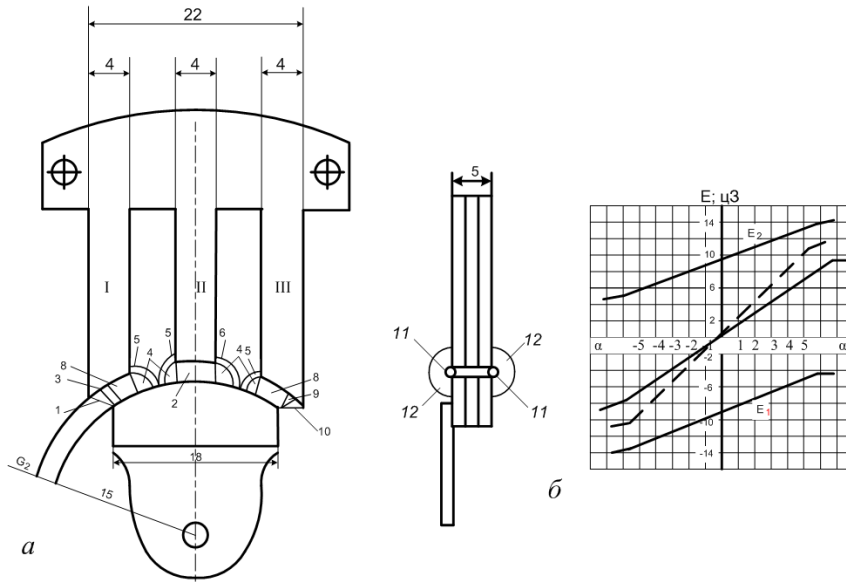


Рис. 7.13. Приклад розрахунку трансформаторного вимірювального перетворювача:

а — спрощена картина поля біля полюсів;
б — характеристики перетворювача за даними розрахунку

Згідно з позначеннями рис. 7.13 сумарні геометричні провідності G_I , G_{II} , G_{III} для відповідного полюса та якоря можна обчислити за формулами

$$G_I = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + 2(G_{11I} + G_{12I}) \quad (7.15)$$

де G_1 , G_2 , G_3 , G_4 , G_5 , G_{11I} , G_{12I} — геометричні провідності силових трубок, причому G_{11I} , G_{12I} — провідності між бічними поверхнями полю-

сів стержнів та якоря за аналогією із силовими трубками 11, 12, показаними на рис. 7.13, а, для полюса II та якоря.

Відповідно для провідностей G_{II} і G_{III} дістанемо

$$G_{II} = 2(G_4 + G_6 + G_{11II} + G_{12II}) + G_1 \quad (7.16)$$

$$G_{III} = G_4 + G_5 + G_8 + G_9 + G_{10} + 2(G_{11III} + G_{12III}). \quad (7.17)$$

За відповідними формулами табл. 7.1 знайдемо провідність кожної силової трубки, а потім сумарні геометричні провідності G_I , G_{II} , G_{III} при середньому положенні якоря та при відхиленні якоря від середнього положення на кути 1° , 2° , 3° , 4° , 5° . Результати обчислень зведемо в табл. 7.2.

2. Обчислимо потік Φ_{II} , що створюється обмоткою збудження. Згідно зі спрощеною схемою заміщення (див. рис. 7.9, б), яка враховує лише провідності повітряних проміжків, можна записати

$$\begin{aligned} \Phi_{II} &= \frac{Iw_1}{R_{II} + \frac{R_1 R_{III}}{R_1 + R_{III}}} = \frac{Iw_1}{\frac{1}{\mu_0 G_{II}} + \frac{1}{\mu_0 G_I} + \frac{1}{\mu_0 G_{III}}} = \\ &= \frac{Iw_1}{1/\mu_0 G_{II} + 1/\mu_0 (G_I + G_{II} + G_{III})} = \frac{Iw_1 G_{II} (G_I + G_{III}) \mu_0}{G_I + G_{II} + G_{III}} \end{aligned} \quad (7.18)$$

Аналізуючи дані табл. 7.2, можна встановити, що поряд із зміною провідностей G_I і G_{III} при повороті якоря сума їх $G_I + G_{III}$ за відсутності навантаження практично лишається сталою (максимальне відхилення суми $G_I + G_{III}$ від середнього її значення в даному разі становить 0,17%). Отже, практично незмінними будуть ефективні значення потоку Φ_{II} обмотки збудження та струм I , що протікає по ній (див. також формулу (7.18)), якщо значення ефективної напруги U незмінне. При середньому положенні якоря $G_I = G_{III}$ потік становить, Вб:

$$\Phi_{II} = Iw_1 \frac{2G_I G_{II} \mu_0}{2G_I + G_{II}} = 1500 \frac{2 \cdot 0,08555 \cdot 0,118 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,08555 + 0,118} I = 1,315 \cdot 10^{-4} I.$$

Сила струму

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}.$$

Згідно з формулою (7.1) можна записати

$$L = \frac{w_1 \Phi_{II}}{I} = 1500 \cdot 1.315 \cdot 10^{-4} = 0,197 \text{ Гн.}$$

Отже,

$$I = \frac{36}{\sqrt{250^2 + (2\pi \cdot 400 \cdot 0,197)^2}} = 0,066 \text{ А} = 66 \text{ мА.}$$

Потік

$$\Phi_{II} = 1,315 \cdot 10^{-4} I = 1,315 \cdot 10^{-4} \cdot 0,066 = 868 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

3. Знайдемо потоки Φ_I і Φ_{III} . Згідно з схемою заміщення

$$\Phi_{II} = \Phi_I + \Phi_{III}; \quad \frac{\Phi_I}{\Phi_{III}} = \frac{G_I}{G_{III}}.$$

Спільне розв'язування цієї системи рівнянь дає

$$\Phi_I = \Phi_{II} \frac{G_I}{G_I + G_{III}}; \quad \Phi_{III} = \Phi_{II} \frac{G_{III}}{G_I + G_{III}}. \quad (7.19)$$

За наведеними формулами обчислюємо значення потоків Φ_I і Φ_{III} при різних положеннях якоря, здобуті дані заносимо в таблицю.

4. Визначимо ефективні значення ЕРС E_I і E_{III} . В, індуковані в кожній із вторинних (сигнальних) обмоток, та напругу $U_{\text{вих}}$ на виході:

$$E_I = 4,44 w_2 f \Phi_I B; \quad E_{III} = 4,44 w_2 f \Phi_{III} B; \quad U_{\text{вих}} = E_{III} - E_I. \quad (7.20)$$

Згідно з даними $w_1=1200$, $f=400$ Гц та обчисленими значеннями потоків обчислимо значення E_I , E_{III} , $U_{\text{вих}}$. Результати розрахунків занесемо в табл. 7.2 і потім побудуємо графік залежності E_I , E_{III} , $U_{\text{вих}}$ як функції кута α повороту якоря від середнього положення.

5. Обчислимо значення E_I , E_{III} , $U_{\text{вих}}$ без урахування випучування потоку. У цьому разі формула (7.18) набере вигляду

$$\Phi_{II} = I w_1 \frac{2G_3 G_1 \mu_0}{2G_3 + G_7} = 1500 \frac{2 \cdot 0,0593 \cdot 0,0988 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,593 + 0,0988} I = 1,015 \cdot 10^{-4} I.$$

Індуктивність

$$L = \frac{w_1 \Phi_{II}}{I} = 1,015 \cdot 10^{-4} \cdot 1500 = 0,152 \text{ Гн.}$$

Сила струму

$$I = \frac{36}{\sqrt{250^2 + (2 \cdot 400 \cdot 0,152)^2}} = 0,079 \text{ А} = 79 \text{ мА.}$$

Потік

$$\Phi_{II} = 1,015 \cdot 10^{-4} \cdot 0,079 = 802 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

Таблиця 7.2

До прикладу розрахунку трансформаторного перетворювача

Кут α повороту якоря від середнього положення, градусів		0	1	2	3	4	5
З врахуванням випучування потоку біля полюсів							
Геометричні провідності, м	σ_I	0,0855	0,0792	0,0726	0,0662	0,0598	0,0535
	σ_{II}	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118
	σ_{III}	0,0855	0,0917	0,0981	0,1044	0,1107	0,1169
Електро-рушійна сила, В	E_I	9,24	8,56	7,86	7,15	6,49	6,79
	E_{II}	9,24	9,93	10,63	11,33	11,99	12,7
	$U_{\text{вих}}$	0	1,37	2,77	4,18	5,5	6,91
Без врахування випучування потоку біля полюсів							
Геометричні провідності, м	σ_3	0,0593	0,0288	0,0462	0,0397	0,0332	0,0267
	σ_7	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988
	σ_8	0,0593	0,0657	0,0722	0,0787	0,0852	0,0917
Електро-рушійна сила, В	E_I	8,44	7,6	6,66	5,72	4,78	3,86
	E_{II}	8,44	9,48	10,42	11,36	12,3	13,22
	$U_{\text{вих}}$	0	1,88	3,76	5,64	7,52	9,36

Формули (7.19) для потоків Φ_I і Φ_{III} набувають такого вигляду

$$\Phi_I = \Phi_{II} \frac{G_3}{G_3 + G_8}; \quad \Phi_{III} = \Phi_{II} - \Phi_I.$$

За цими формулами для кожного кута повороту якоря обчислимо значення Φ_I і Φ_{III} , а потім за формулами (7.20) – значення E_I , E_{II} , $U_{\text{вих}}$. Здобуті результати зведемо в табл. 7.2. На рис. 7.13, б пунктирною лінією показано графік залежності $U_{\text{вих}}$ як функції кута α повороту якоря від середнього положення для даного випадку. Як впливає із здобутих даних, максимальний роззбіг значень напруг $U'_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вих}}$, обчислених з врахуванням випучування потоку біля полюсів і без врахування такого випучування для перетворювача заданих розмірів становить 35 %:

$$((9,36 - 6,91) / 6,91) \times 100\% = 35\%.$$

7.9. Контрольні питання до розділу 7

1. Індуктивні перетворювачі. Застосування.
2. Конструктивні різновиди ІП.
3. Принцип дії ІП. Переваги і недоліки. Область застосування.
Розрахунок.
4. Диференційні індуктивні перетворювачі. Основні розрахункові співвідношення.
5. Трансформаторні перетворювачі (ТрП). Застосування.
6. Принцип дії ТрП. Призначення. Переваги і недоліки.
7. Основні конструктивні різновиди ТрП.
8. Трансформаторні перетворювачі. Основні розрахункові співвідношення.
9. Трансформаторні перетворювачі з переміщуваним ротором. Переваги і недоліки. Принцип дії. Конструктивні різновиди схем.
10. Трансформаторні перетворювачі з переміщуваним якорем. Переваги і недоліки. Приклади схем.

Розділ 8. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВЧІ

8.1. Загальна характеристика п'єзоелектричних перетворювачів

Одна з перших спроб застосувати п'єзоперетворювач для вимірювання статичних зусиль – перетворювач, запропонований О.І. Чинакалом і Ф.Ф. Гаманом [16, 17, 24]. Він складається з двох ідентичних п'єзоелементів, складених у стовпчик через заземлену струмопровідну прокладку. Один із п'єзоелементів підключено до генератора електричних коливань, другий – до вимірювального приладу. До зовнішніх поверхонь п'єзоелементів прикладено вимірюване зусилля. Під дією статичного зусилля змінюється амплітуда механічних коливань п'єзоелементів і відповідно різниця потенціалів на електродах п'єзоелемента, підключеного до вимірювального приладу. У цьому разі динамічний режим роботи п'єзоперетворювача створюється штучно збудженням його від генератора електричних коливань.

На основі даного пристрою розроблено перетворювач для вимірювання малих тисків газового середовища, який має істотно нелінійну вихідну характеристику. Причиною нелінійності є не зовсім зручний спосіб реалізації принципу вимірювання статичних зусиль. Вимірюване зусилля в згаданому перетворювачі характеризується напругою, що знімається з другого п'єзоелемента. Ефективність передавання механічних коливань від першого п'єзоелемента до другого залежить від акустичного опору шару клею та заземленої прокладки, зміна характеристик яких і визначає головним чином зміну вихідного сигналу перетворювача.

Досконаліші перетворювачі статичних зусиль виконані на основі п'єзоелектричних трансформаторів з двома системами електродів, до однієї з яких підключено генератор електричних коливань, а до іншої – вимірювальний прилад. В даному разі п'єзоперетворювач – це єдина коливальна система, тому він не має недоліків, притаманних біморфним перетворювачам. Значення вимірюваного зусилля характеризується зміною напруги на вихідній системі електродів або зміною зсуву фаз між напругами на вхідній та вихідній системах електродів.

Останніми роками використовуються п'єзрезонатори, ввімкнені в коло автогенераторів [37, 65]. Робота перетворювачів ґрунтується на

зміні частоти механічного резонансу п'єзоелектричного резонатора при зовнішніх впливах.

Інтенсивні дослідження, пов'язані з п'єзоперетворювачами, проводять у науково-дослідній лабораторії Томського політехнічного інституту [65, 67]. Застосування п'єзокерамічних елементів на базі сегнето- і п'єзоматеріалів відкриває широкі перспективи в різних галузях науки і техніки.

П'єзоелектричні перетворювачі застосовують в радіоелектроніці, пристроях автоматики, обчислювальній і вимірювальній техніці.

Завдяки розвитку цього нового науково-технічного напрямку було створено високоефективні п'єзоелектронні джерела високої (до 100 кВ) та низької напруги, п'єзоприводні пристрої широкого призначення з поступальним, обертальним і складним видами руху, п'єзокерамічні матриці і запам'ятовуючі пристрої.

Застосування п'єзоперетворювачів ефективно і водночас, досить просто вирішує багато проблем вимірювання різних фізичних величин електричної та неелектричної природи. П'єзоелементи широко використовують як економічні перетворювачі енергії сигналів.

Основа створення різноманітних за функціональним призначенням п'єзоперетворювачів – ефекти та явища активного п'єзоелектричного середовища, які становлять базу для інтеграції функцій. Ці ефекти еквівалентні численним взаємопов'язаним між собою елементним компонентам, за рахунок чого можна отримати значне зменшення масогабаритних показників пристроїв, знижувати їх вартість і підвищувати надійність.

П'єзокерамічні перетворювачі твердотілі, можуть бути виконані в об'ємному, плоскому та інтегральному виглядах і характеризуються високою заводо захищеністю, малим рівнем власних шумів, підвищеною радіаційною стійкістю, технологічністю виготовлення.

Досягнуті успіхи та значні перспективи, пов'язані з використанням п'єзокерамічних перетворювачів у різних областях науки і техніки, стимулюють інтенсивні розробки, великий і все зростаючий інтерес до використання різноманітних властивостей п'єзоматеріалів.

В цьому напрямку широко ведуться дослідження як у країнах СНД, так і у США, Японії, Німеччині, Франції, Англії та інших країнах.

Можливість використовувати п'єзоперетворювачі в приладобудуванні та автоматичі виникла лише на початку 60-х років, коли був

освоений промисловий синтез п'єзокерамічних матеріалів, які мають порівняно з такими природними п'єзоелектриками, як кварц, сегнетова сіль, турмалін тощо, вищі чутливість, механічну міцність та температурну стабільність.

Тепер вирішено багато проблем, пов'язаних з дослідженням властивостей п'єзокерамічних елементів, їх застосуванням у приладобудуванні, пристроях автоматики й обчислювальної техніки.

Основні переваги п'єзоперетворювачів: висока жорсткість (дуже мала деформація при навантаженні); висока чутливість; можливість конструювати прилади виключно малих розмірів (наприклад, розроблено перетворювачі, маса яких менша за 1 г); проста конструкція.

Недолік п'єзоперетворювачів полягає в тому, що в звичайному виконанні їх не можна використовувати для вимірювання статичних або повільно змінюваних зусиль.

Мінімальне значення частоти вимірюваного перетворювачем зусилля

$$f_{\min} \gg \frac{1}{\tau}; \quad \tau = R_{\Sigma} C_{\Sigma},$$

де R_{Σ} – сумарний опір витоку, утворений поверхневим та об'ємним опором п'єзоперетворювача і вхідним опором вимірювального кола; C_{Σ} – сумарна ємність між гранями п'єзоперетворювача та вхідного кола вимірювального приладу.

Отже, щоб виміряти зусилля, частота якого наближається до нуля, потрібно мати $\tau = \infty$. Для $P = \text{const}$, $f \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow \infty$.

8.2. Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів. Особливості роботи

У п'єзоелектричних приладах як первинний перетворювач використовують кристали деяких діелектриків, що характеризуються п'єзоелектричними властивостями.

П'єзоефект полягає в тому, що при стиску або розтягу пластини, виготовленої з такого кристала, на гранях виникає електричний заряд, пропорційний до діючої сили.

Знак заряду залежить від виду деформації і при переході від стиску до розтягу змінюється на протилежний.

П'єзоефект є оборотним. Це означає, що коли вмістити таку пластину в електричне поле, геометричні розміри її змінюються. Ця зміна

тим більша, чим більший електричний потенціал, під яким перебувають грані п'єзопластини.

Матеріали, що мають п'єзоелектричні властивості: кварц, сегнетова сіль, фосфат амонію, кераміка титанату барію тощо.

Найбільшу чутливість серед них має сегнетова сіль. Проте п'єзоелектричні властивості її значною мірою залежать від температури, а при температурі 38°C майже зникають.

Для побудови точних вимірювальних пристроїв використовують пластинки з кварцу, що пояснюється його високою механічною та електричною міцністю. П'єзоелектричні властивості кварцу меншою мірою залежать від температури і не змінюються навіть при температурі до $250\text{...}300^{\circ}\text{C}$. Важлива перевага кварцу – лінійність його характеристик при навантаженні аж до зруйнування.

У кристалах кварцу розрізняють такі головні осі (рис. 8.1).

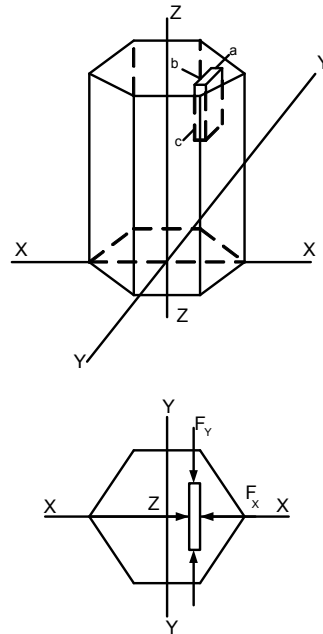


Рис 8.1. Осі симетрії в кристалі кварцу

Поздовжню вісь $z - z$ називають оптичною; вісь $x - x$, що проходить через ребра шестигранної призми нормально до оптичної осі, – електричною; вісь $y - y$, нормальну до граней, – механічною.

Якщо з кристала кварцу вирізати пластину так, щоб її грані були паралельні електричній, оптичній і механічній осям, то під впливом сил F_x і F_y , що діють перпендикулярно до оптичної осі, пластина електризується; на площинах, перпендикулярних до електричної осі, виникають заряди.

При дії сили, направленої вздовж оптичної осі, кварцова пластина не електризуватиметься.

Кількість електрики, що виникла на площинах пластини при прикладенні однорідної розтягуючої (стискаючої) сили, знаходять за таких умов.

1. Сила F направлена вздовж електричної осі:

$$Q = k_1 F_x. \quad (8.1)$$

2. Сила F_x направлена вздовж механічної осі:

$$Q = -k_1 \frac{S_x}{S_y} F_y, \quad (8.2)$$

де Q – електричний заряд, Кл; F_x, F_y – сили, що діють перпендикулярно до оптичної осі пластини, Н; S_x, S_y – площі поверхонь, перпендикулярних до відповідних осей; k_1 – п'єзоелектрична стала (для кварцу $2,14 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н).

Рівняння (8.2) показує, що величини зарядів, які виникають на гранях bc під дією сили F_x , не залежать від геометричних розмірів пластини.

П'єзоефект, що виникає під дією сили F_x називають поздовжнім. Його здебільшого використовують при побудові п'єзоелектричних приладів.

Під дією сили F_y заряди також виникають на гранях bc , проте їх величина згідно з рівнянням (8.2) залежить від геометричних розмірів пластини. Цим іноді користуються, щоб підвищити чутливість п'єзоперетворювача, збільшивши відношення S_x/S_y ($S_x/S_y \downarrow$ або $S_x \uparrow / S_y$).

Знак «–» у рівнянні (8.2) показує, що при розтягуючих силах вздовж осі y знаки зарядів будуть протилежними порівняно з випадком, коли розтягуючі сили направлені вздовж осі x .

П'єзоефект, що виникає під дією сили F_y , називають поперечним.

П'єзоелектричні перетворювачі застосовують для побудови приладів, призначених для вимірювання змінних тисків, прискорень, сил.

Щоб збільшити чутливість п'єзоперетворювача, використовують відразу кілька пластин, які послідовно навантажують однією й тією ж самою силою (рис 8.2). В п'єзопакеті всі грані з позитивними і негативними зарядами електрично з'єднані. Таким чином, загальний заряд, що його отримують на перетворювачі, дорівнює сумі зарядів окремих пластин.

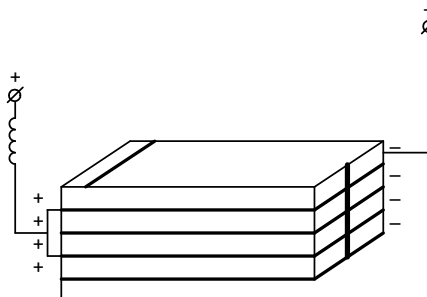


Рис. 8.2. Схема п'єзопакета

Щоб отримати п'єзопакет, грані пластин, з яких знімається заряд, металізують колоїдним сріблом і далі склеюють, використовуючи це металізоване покриття. Як правило, пакети з п'єзопластин мають більшу міцність, ніж окремі п'єзоелементи. Проте такі п'єзопакети мають нижчу частоту коливань.

Власна частота однієї пластини

$$f = \frac{k_2}{d}, \quad (8.3)$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності (для кварцу $k_2=2280$ кГц·мм, для сегнетової солі $k_2=1540$ кГц·мм, для титанату барію $k_2=2200$ кГц·мм); d – товщина п'єзопластини, мм.

8.3. Приклад практичного застосування п'єзоперетворювача

На рис. 8.3 показано приклад конструктивного виконання п'єзоперетворювача приладу для вимірювання коливань тиску P , який сприймається мембраною 6; через металеві прокладки 5 цей тиск передається на п'єзопластини 3; середня прокладка з'єднана з виводом 1, який проходить через втулку 2 з ізоляційного матеріалу.

Зусилля від мембрани передається на п'єзопластини через кульову опору гвинта 4, що сприяє рівномірному навантаженню по всій поверхні пластини.

В п'єзоелектричному чутливому елементі для вимірювання прискорень, вібрацій (рис. 8.4) в разі виникнення інерційної сили зміщується інерційна маса 2 відносно корпусу 1, закріпленого на досліджуваному об'єкті. П'єзоелектрики 4 затискають між масою 2 і корпусом 1 за допомогою мембрани 3. Величина п'єзоелектричних зарядів буде пропорційна до величини прискорення, що далі реєструється на стрічці самозаписуючого приладу.

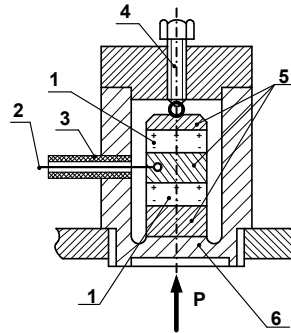


Рис. 8.3. Конструктивна схема п'єзопретворювача

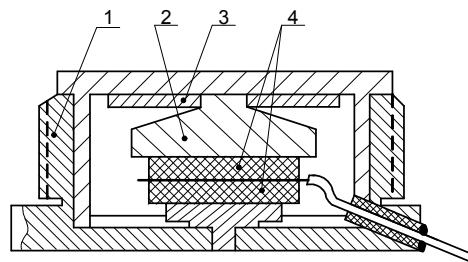


Рис. 8.4. Схема п'єзопретворювача приладу для вимірювання прискорення та вібрацій

8.4. Вимоги до вимірювальної схеми п'єзоелектричного приладу

Кількість електрики, що виникає на гранях кварцової пластини в момент прикладення сили, надзвичайно мала. Тому для вимірювання

потрібно застосовувати такі методи і прилади, які не витрачали б зарядів, що утворюються на пластині.

Повністю розв'язати цю задачу принципово неможливо, проте витік зарядів з кварцу через вимірювальну схему можна зробити досить малим, в межах допустимої похибки.

Електричний заряд на пластині перетворювача може змінитися внаслідок впливу побічних електричних полів. Проте, застосувавши електростатичний екран, для п'єзоперетворювача ці впливи можна звести до нуля.

В п'єзоелектричних приладах звичайно вимірюють не заряд Q , а напругу U , яка розвивається на ємності, що утворена обкладками пластини:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (8.4)$$

де C – власна ємність п'єзопластини;

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S_x}{d}; \quad (8.5)$$

$\varepsilon = \varepsilon_k \varepsilon_0$, де $\varepsilon_k = 3,5$ – діелектрична стала для кварцу; S_x , d – відповідно площа та товщина-поверхні пластини; ε_0 – діелектрична стала вакууму ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Підставивши в формулу (8.4) значення C і Q (з формул (8.1) і (8.5)), дістанемо значення напруги, яка виникає в пластині в момент прикладення сили:

$$U = \frac{k_1 d F_x}{\varepsilon \cdot S_x}. \quad (8.6)$$

В реальних умовах перетворювач вмикають в спеціальні вимірювальні схеми, а тому паралельно його власній ємності C будуть ввімкнені ємності, наприклад, вхідного кола підсилувача $C_{вх}$, з'єднувального кабелю C_k . В цьому разі напруга, яку розвиває перетворювач, зменшиться і згідно з формулою (8.4) становитиме

$$U = \frac{Q}{C + C_{вх} + C_k}. \quad (8.7)$$

З (8.7) випливає: щоб отримати максимальну напругу і найбільшу чутливість, слід прагнути до того, щоб кожна з складових сумарної ємності була якомога меншою.

Основна трудність при вимірюванні напруги – її безперервний спад у часі через витікання заряду з пластин. Розглянемо це явище, дослідивши принципову схему п'єзоелектричного приладу для вимірювання сил (рис. 8.5, а). Через електроди, заряджені від'ємним зарядом, грані з'єднуються з підсилювачем.

Ємність C_{Σ} між частиною перетворювача, що несе заряд, і землею містить такі складові:

- ємність між гранями кварцової пластини C ;
- ємність з'єднувального кабелю C_K ;
- вхідна ємність підсилювача $C_{вх}$.

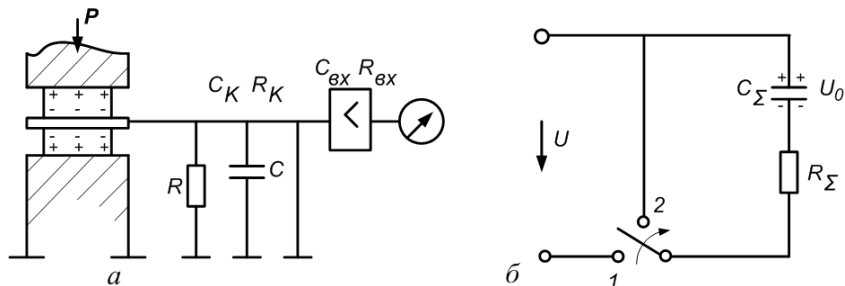


Рис. 8.5. Принципова (а) та еквівалентна (б) схеми п'єзоелектричного приладу для вимірювання сили

Опір R_{Σ} складається з таких компонентів:

- поверхневий та об'ємний опори кварцу R ;
- опір ізоляції з'єднувального кабелю R_K ;
- вхідний опір підсилювача $R_{вх}$.

Зазначену схему можна звести до еквівалентної схеми (рис. 8.5, б), що складається з конденсатора C_{Σ} , розряд якого через опір R_{Σ} можна розглядати як витік заряду пластини п'єзоперетворювача.

Розглянемо процес розряду конденсатора C_{Σ} , який було заряджено від джерела живлення до напруги U_0 через опір R_{Σ} (перемикач після заряду конденсатора переводиться з положення 1 в положення 2).

В початковий момент часу в колі виникає струм $I=U_0/R_{\Sigma}$ і конденсатор починає розряджатися, внаслідок чого напруга U_t (і струм в колі) зменшуються. Швидкість процесу розряду характеризується сталою часу кола

$$\tau = R_{\Sigma}C_{\Sigma}. \quad (8.8)$$

Чим більше τ , тим повільніший процес. Через інтервал часу $5\tau=5R_{\Sigma}C_{\Sigma}$ напруга на конденсаторі (і струм в колі) зменшиться приблизно до 1% від початкового значення, і процес розряду конденсатора можна вважати завершеним. Графічно процес розряду конденсатора показано на рис. 8.6.

Таким чином, для вимірювання початкової напруги на обкладках конденсатора, тобто напруги, яка відповідає моменту замикання контакту 2, потрібно, щоб швидкість падіння U_t була невеликою, а це можливо при великому R_{Σ} . Вхідний опір підсилувача має бути по можливості більшим, оскільки він є складовою частиною R_{Σ} .

Для схеми п'єзоелектричного приладу момент замикання контакту 2 відповідатиме моменту прикладення навантаження до пластини. Заряд, що виник (він пропорційний до прикладеної сили), з цього моменту почне витікати через навантаження. Швидкість витікання також характеризуватиметься добутком $R_{\Sigma}C_{\Sigma}$. Якщо прикладена сила повільно змінюється в часі, а швидкість витікання заряду велика, виміряти цю силу практично неможливо.

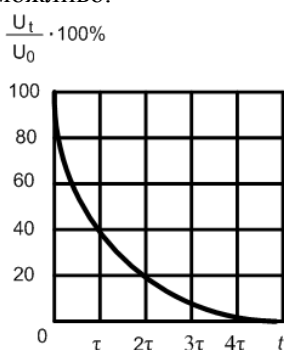


Рис. 8.6. Зміна напруги при розряді конденсатора

Закон зміни потенціалу в часі t на гранях п'єзопластини з деяким спрощенням описується виразом

$$\frac{U_t}{U_0} = I - \frac{t}{5R_{\Sigma}C_{\Sigma}}, \quad (8.9)$$

де U_t - напруга на п'єзопластині через час t після прикладання навантаження; U_0 - початкова напруга, яка виникла на п'єзопластині в момент прикладення навантаження.

Вираз (8.9) дає змогу визначити за допустимим зменшенням потенціалу в заданий момент часу і відомою ємністю C_{Σ} потрібний опір:

$$R_{\Sigma} = \frac{t}{5 \left(1 - \frac{U_t}{U_0} \right) C_{\Sigma}}. \quad (8.10)$$

Залежно від характеру вимірюваного динамічного процесу допустиме зменшення потенціалу в одиницю часу може бути різним.

Як вже зазначалося, опір R_{Σ} має бути великим. Саме тому ставляться особливі вимоги до поверхневого опору кварцової пластини. Питомий об'ємний опір кварцу в напрямі електричної осі при температурі 20°C дорівнює $20 \cdot 10^{15}$ Ом·см²/см. В кварцових пластинах, що застосовуються в приладах, опір становить $10^{15} \dots 10^{16}$ Ом.

Проте поверхневий опір кварцу через його гігроскопічність істотно залежить від вологості навколишнього середовища. Щоб збільшити поверхневий опір кварцової пластини, потрібно підвищити чистоту її поверхні. Поверхню ретельно промивають спиртом і просушують, іноді застосовують спеціальні осушувачі, які розміщують в корпусі (захисному кожусі) перетворювача. На поверхневий опір п'єзопластин слід звернути особливу увагу.

Вхідне коло підсилювача також має бути з високим опором. Щоб виконати цю вимогу, застосовують підсилювачі, на вході яких розміщено електронні лампи з малою вхідною ємністю і дуже великим вхідним опором.

8.5. Приклади розрахунку п'єзоперетворювачів

Приклад 8.1. Визначити напругу між обкладками кварцового п'єзоелектричного перетворювача, якщо діє сила $F=1$ кгс=9,81 Н, площа пластини $S_x=5$ см²= $5 \cdot 10^{-4}$ м², а її товщина $d=0,5$ см=0,005 м.

Розв'язання. Ємність п'єзоелектричного перетворювача

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S_x}{d} = \frac{3,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Необхідна напруга

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF_x}{C} = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81}{3,1 \cdot 10^{-12}} = 6,8 \text{ В.}$$

Проте ця напруга не може бути безпосередньо виміряна приладом, який споживає потужність, оскільки він розряджатиме п'єзоелемент

навіть в процесі створення зарядів. Тому напруга, що знімається з п'єзоперетворювача, звичайно подається на спеціальну електронну лампу з малою вхідною ємністю і надзвичайно великим вхідним опором. Принципову схему такого підключення показано на рис. 8.7. Зі схеми бачимо, що паралельно пластині п'єзоперетворювача приєднано ємність вимірювальної схеми C_{cx} , яка складається з ємності з'єднувального дроту (відносно заземленої схеми) і вхідної ємності підсилювача.

З врахуванням шунтуючого впливу ємності C_{cx} напруга, яка знімається з п'єзоперетворювача, буде дорівнювати

$$U = \frac{Q}{C + C_{cx}} = \frac{kF_x}{C + C_{cx}}. \quad (8.11)$$

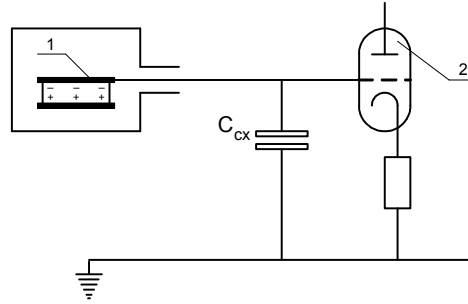


Рис. 8.7. З'єднання п'єзо-елемента з входом підсилювача

Приклад 8.2. Визначити напругу, що знімається з п'єзоперетворювача, за даними, наведеними в прикладі 8.1, якщо ємність схеми $C_{cx} = 4 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Розв'язання.

$$U = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81}{3,1 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12}} = 2,96 \text{ В.}$$

Наявність шунтуючої ємності приводить до значного зниження сигналу, що знімається з п'єзоелемента.

Приклад 8.3. Визначити напругу, що виникає між обкладками п'єзоелектричного перетворювача з розмірами, наведеними в прикладі 8.1, за такої умови: тиск F_x , який діє на його гранях, дорівнює $10 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ для випадку $C_{cx} = 0$. Обчислити значення C_{cx} , при

якому напруга, що знімається з п'єзоперетворювача і подається на вхід підсилювача, не перевищує 8 В.

Розв'язання. При $C_{cx}=0$ напруга

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF_x S_x}{C} = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{3,1 \cdot 10^{-12}} = 339 \text{ В.}$$

Необхідне значення C_{cx} при $U=8$ В визначимо з (8.11):

$$C_{cx} = \frac{Q}{U} - C = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{8} - 3,1 \cdot 10^{-12} = 128 \text{ нФ.}$$

8.6. Контрольні питання до розділу 8

1. П'єзоелектричні перетворювачі. Призначення ПеП.
2. Визначення, переваги і недоліки ПеП. Особливості.
3. П'єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії. Основні розрахункові співвідношення. Конструктивні різновиди. Приклади застосування.
4. Схеми включення ПеП.
5. Дайте визначення прямому і зворотньому п'єзоефектам.
6. Дайте визначення основним вимірювальним осям п'єзокристала.
7. Дайте визначення повздовжньому і поперечному п'єзоефекту.
8. Дайте приклади використання ПеП у вимірювальних приладах.
9. Чи можна використовувати ПеП у звичайному виконанні для вимірювання постійних або повільно змінюючихся сигналів.

Розділ 9. МЕХАНОТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (МП)

9.1. Загальна характеристика МП

Механотронні перетворювачі розроблені і освоєні в серійному виробництві на Московському заводі електровакуумних приладів – головному підприємстві виробничого об'єднання МЕЛЗ. Вони широко застосовуються в сучасних засобах контролю і регулювання різних механічних параметрів в машинобудуванні, електронному приладобудуванні, автоматичі та інших галузях промисловості; працюють на постійному струмі, характеризуються високою чутливістю і дуже малою зоною нечутливості.

Механотрони хоча і поступаються деяким з інших типів електро-механічних перетворювачів щодо потужності, яку споживають, проте за сукупністю техніко-економічних показників в багатьох варіантах застосування переважають їх.

Вітчизняна промисловість випускає серійно 12 типів МП, які від перетворювачів інших типів відрізняються високою чутливістю, достатньою лінійністю вихідних характеристик, широкими робочими діапазонами вимірювань, а також малими габаритними розмірами і масою, простотою вимірювальних схем і низькою вартістю.

На основі МП приладобудівна промисловість протягом багатьох років серійно випускає прилади і контрольно-сортувальні автомати для розмірного контролю деталей машинобудування, серед яких слід згадати механотронні профілометри типів 253 і 283. На базі МП створена і успішно експлуатується різноманітна контрольно-вимірювальна та регулювальна апаратура, що використовується для виготовлення виробів електронної техніки, в тому числі високопродуктивні контрольно-сортувальні автомати і прилади для контролю розмірних параметрів виробів електронної техніки, прилади для контролю якості інтегральних схем, автоматичні системи керування технологічними процесами при виготовленні виробів електронної техніки (наприклад, програмні регулятори тиску та вакууму, призначені для автоматизації процесу виготовлення феритових виробів тощо). МП застосовуються в різній апаратурі для випробування матеріалів, механізмів машин, в приладах наукових досліджень тощо.

Механотронні перетворювачі — це електровакуумні прилади з механічно керованими електродами. При дії зовнішнього механічного

сигналу в МП переміщується один або кілька рухомих електродів, що приводить до відповідної зміни анодного струму МП.

Використовуючи цей ефект, за допомогою МП вдається перетворювати різні механічні величини в електричні сигнали.

МП можуть бути як вакуумними, так і газонаповненими. Залежно від виду вимірюваної механічної величини МП поділяють на перетворювачі переміщень, зусиль, тисків, прискорень, кутів повороту та параметрів вібрацій.

За способом керування електронним струмом МП поділяють на прилади з поздовжнім, поперечним, зондовим, диференціальним і променевим керуванням [1, 8, 9, 10, 16, 17, 21, 30, 35, 43, 45, 51, 52, 67].

9.2. Механотронний перетворювач з поздовжнім переміщенням анода відносно катода

Промисловість випускає кілька типів МП. Найбільший інтерес для лінійних вимірювань становлять механотрони з поздовжнім переміщенням анода відносно катода (рис. 9.1, напрям переміщення показано стрілками). Таке переміщення дає змогу отримати перетворювач високої чутливості.

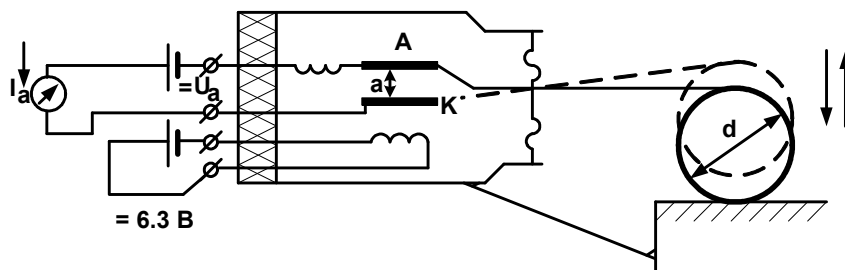


Рис. 9.1. Принципова схема механотрона з поздовжнім переміщенням анода

Зображений на рис. 9.1 механотрон являє собою лампу-діод з підігрітим катодом, в якій відстань a між катодом K і анодом A змінюється внаслідок змін лінійної величини d , що контролюється. В результаті отримуємо залежність між анодним струмом лампи I_a та відстанню a між анодом і катодом.

В такому діоді з плоскопаралельними електродами анодний струм наближено дорівнює

$$I_a = \frac{A \cdot S_k \cdot U_a^{3/2}}{a^2}, \quad (9.1)$$

де $A=2,33 \cdot 10^{-6}$ – сталий коефіцієнт, що має розмірність $A \cdot B^{-3/2}$, S_k – активна площа поверхні катода, звернена до анода, мм^2 ; U_a – стала напруга між анодом і катодом, В; a – відстань між анодом і катодом, мм.

Рівняння (9.1) дає змогу знайти основну статичну характеристику механотрона $I_a=f(a)$ при сталій U_a .

При певному значенні U_a і деякому мінімальному значенні a_{\min} настає такий момент, коли анодний струм лампи не залежить від переміщення. Такий режим роботи лампи називають режимом насичення. Певному значенню напруги U_a відповідає певне значення a_{\min} (рис. 9.2).

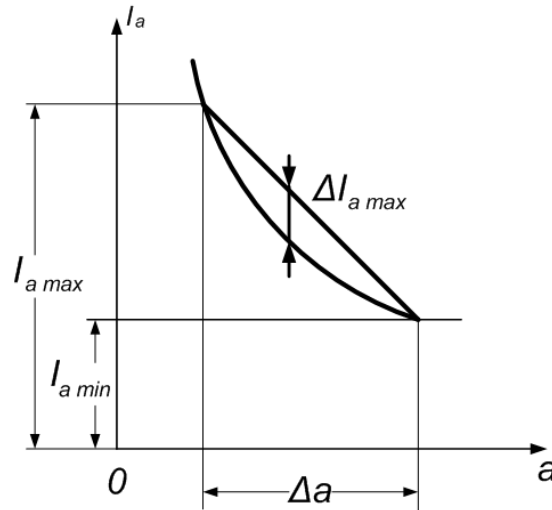


Рис. 9.2. Характеристика механотрона з поздовжнім переміщенням анода

Для нормальної роботи механотрона потрібно, щоб в процесі вимірювань відстань між анодом і катодом ніколи не досягала значення a_{\min} .

Згідно з рівнянням (9.1) характеристика механотрона має явно нелінійний вигляд (рис. 9.2). Ступенем нелінійності характеристики $I_a=f(a)$ називають її найбільше відхилення від прямої, віднесене до різниці найбільшого та найменшого значень анод-

ного струму в даному діапазоні переміщень $\Delta a = a_{\max} - a_{\min}$. рухомого електрода

$$\varepsilon = \frac{\Delta I_{a \max}}{I_{a \max} - I_{a \min}}. \quad (9.2)$$

Ступінь нелінійності ε характеристики $I_a = f(a)$

$$\varepsilon = \frac{1}{4z} \left[3 + z^2 + 3(1-z)^{2/3} \right] \cdot 100\%, \quad (9.3)$$

де $z = a_0 / \Delta a$ – відносне зміщення рухомого електрода; a_0 – початкова відстань між анодом і катодом; Δa – переміщення рухомого електрода.

З (9.3) бачимо, що нелінійність характеристики не залежить від анодної напруги і визначається лише відносним зміщенням електрода.

Використовуючи (9.1), можна визначити чутливість МП за струмом ψ_I , яка показує, наскільки зміниться анодний струм при зміні відстані на одиницю довжини, А/мм:

$$\psi_I = \frac{dI_a}{da} = -2 \frac{A \cdot S_k \cdot U_a^{3/2}}{a^3}. \quad (9.4)$$

Щоб зменшити вплив на результати вимірювань (на I_a) коливань напруги живлення U_a і температури, а також підвищити чутливість (в разі використання мостової схеми), застосовують, як правило, подвійний діод типу 6МХ-1С (рис. 9.3).

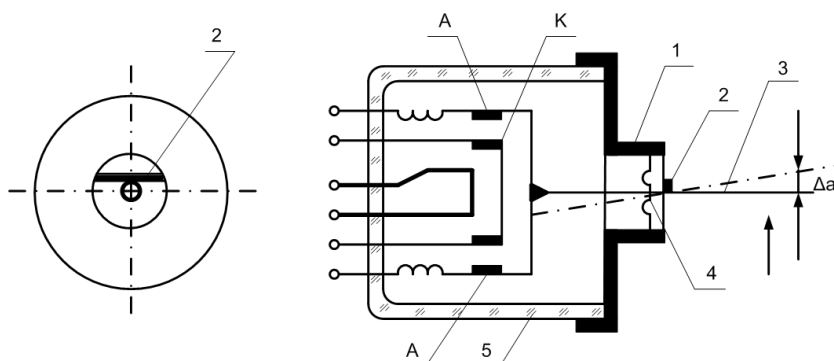


Рис. 9.3. Принципова схема механотрона типу 6МХ-1С з подвійним діодом

Його технічні характеристики [8 – 10]:		
Номінальна напруга підігріву катода, В	6,3	
Номінальна напруга анода, В	10	
Внутрішній опір, кОм, не більш як		1,5
Чутливість за струмом, мкА/мм, не менш як	30	
Діапазон переміщень, мкм	±100	
Вимірювальне зусилля, сН	±10	
Варіація показів, мкм, не більш як	0,04	
Довговічність, годин	1000	
Габаритні розміри, мм:		
діаметр	27,3	
довжина (без вимірювального стрижня)	80	
довжина плеча вимірювального важеля	30	

Вимірюване переміщення Δa сприймається вимірювальним важелем 3 (рис. 9.3), на якому закріплені обидва аноди A .

Відстань від катода K до анода змінюється з різними знаками, що спричиняє відповідну зміну провідності обох половин ламп. Важіль 3 підвішено до корпусу МП за допомогою мембрани 4, яка герметизує внутрішню порожнину лампи і дає змогу важелю повертатися в будь-якому напрямі, але робочим є переміщення, що максимально змінює відстань між катодом і анодами. У цьому разі досягається найбільша чутливість перетворювача.

Підвищення жорсткості підвіски важеля механотрона в напрямі, перпендикулярному до робочого, досягається за допомогою спеціальної розтяжки 2, кінці якої приварені до країв трубки 1, а середина – до важеля.

Таке конструктивне рішення дає змогу значно зменшити чутливість механотрона до шкідливих силових впливів.

Механотрон кріпиться за допомогою металевої трубки 1, яка охоплює мембрану і прикріплена до скляної оболонки 5 лампи. Трубка і мембрана повинні мати такий самий коефіцієнт лінійного розширення, як і скляна оболонка.

Для оболонок механотронів звичайно застосовують скло марки С-49-2, а для мембрани і трубки – сплав ковар 29НК. Зазначені коефіцієнти цих матеріалів однакові, завдяки чому вдається значно зменшити похибки, пов'язані з тепловими деформаціями деталей механотрона.

Механотрон має п'ять виводів, що приєднуються до вимірювальної схеми: два анодних, один катодний і два виводи для підігріву катода.

9.3. Вимірювальні схеми МП

МП найчастіше вмикають в симетричні мостові схеми (рис. 9.4), де $R_1=R_2=R_a$ – омичні опори моста, які є опорами навантаження в анодних колах лампи; R_i – внутрішній опір лампи (на рис. 9.4 показаний пунктиром).

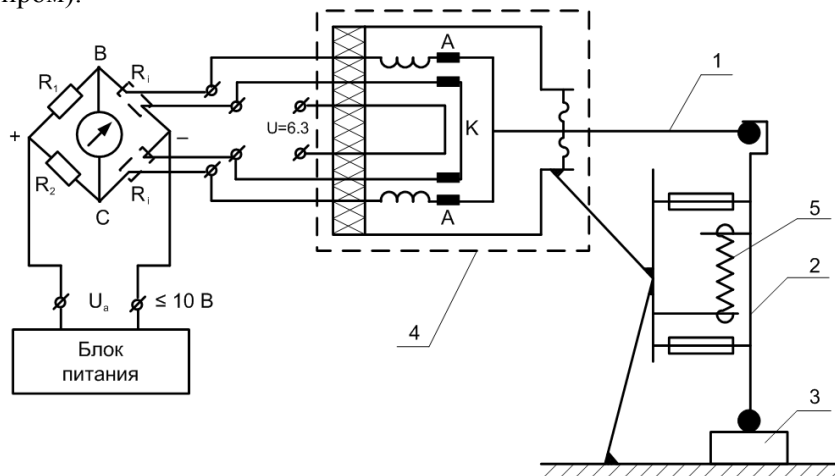


Рис. 9.4. Принципова схема механотронного приладу

Внутрішній опір можна визначити за відомими параметрами лампи:

$$R_i = \frac{2}{3} \frac{a^2}{A \cdot S_k \cdot U_a^{1/2}}$$

Значення R_i наводиться в заводській технічній характеристиці МП. В результаті експериментальних досліджень анодних механотронів було встановлено, що нелінійність характеристики $I_a=f(a)$ залежить від відношення анодного навантаження R_a до внутрішнього опору механотрона R_i .

При деякому оптимальному значенні R_{aopt} характеристика механотрона стає лінійною. Для мостової симетричної схеми значення R_{aopt} пов'язане з R_i так:

$$R_{aopt} = (2 - 3,5)R_i. \quad (9.5)$$

При виборі відлікового пристрою (мікроамперметра) потрібно намагатися досягти того, щоб його опір R_H дорівнював вихідному опору всього мосту, тобто опору, який виміряний між точками B і C .

Вихідний опір мосту

$$R_{вих} = \frac{2R_a R_i}{R_a + R_i}, \quad (9.6)$$

тоді

$$R_H = R_{вих} = \frac{2R_a R_i}{R_a + R_i}.$$

Враховуючи (9.4), отримуємо потрібний опір відлікового пристрою

$$R_H = (1 - 2)R_i. \quad (9.7)$$

В якості відлікового пристрою здебільшого застосовують мікроамперметри постійного струму типів М-24, М 265 М, М 266 М, М 136/1 та інші.

Щоб отримати дискретні сигнали команд, потрібні для автоматизації контролю, прилад доповнюють командним пристроєм.

Щоб провести налагодження, мостову схему доповнюють декількома опорами (рис. 9.5).

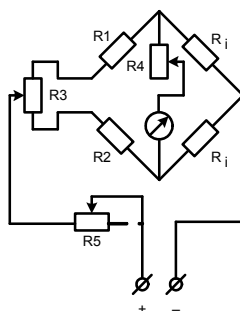


Рис. 9.5. Вимірювальна схема механотронного приладу

Змінний опір $R3$ призначено для балансування мосту при середньому положенні вимірювального важеля механотрона, а змінні опори $R4$ та $R5$ – для регулювання ціни поділки шкали приладу.

Важливе значення для точності МП має стабілізація їх напруги живлення.

Особливо чутливий МП до коливань анодної напруги, меншою мірою – до коливань напруги підігріву катода.

Для зменшення зазначених похибок використовують високоточні стабілізатори напруги з коефіцієнтом стабілізації 30...50.

Для зменшення похибок приладів з МП потрібно дотримуватися певних умов їх роботи.

Щоб знизити катодний дрейф нуля, спричинений зміною струму емісії катода, крім мостових схем потрібно застосовувати низькі анодні напруги. Звичайно анодна напруга високочутливих діодних МП не перевищує 10В, а часто становить всього лише 4...5В.

Особливо чутливий МП до температурних змін. Схему МП потрібно вмикати за 15...30 хвилин до початку роботи для стабілізації температури.

Значну увагу слід наділити захисту зовнішніх частин МП від дії потоків охолодженого або нагрітого повітря. З цією метою МП рекомендовано захищати закритими кожухами (див. рис. 9.4).

Щоб захистити електроди механотрона від ударів, переміщення від деталі 3 на вимірювальний важіль 1 передаються за допомогою проміжного стрижня 2 (див. рис. 9.4). В цьому разі важіль МП звільнений від ударів, а стрижень з своєю потужною пружинною підвіскою сприймає шкідливі сили і передає переміщення важелю лише по лінії вимірювання.

Переміщення вводять в середину колби механотрона через пружні скляні чи металеві мембрани або через гофровані трубки. Можливе також переміщення електродів за допомогою магнітного поля. В деяких випадках джерело зусилля, яке діє на електрод, можна розмістити в середині балона. Це роблять, наприклад, коли використовують механотрони для вимірювання прискорень і вібрацій.

Області використання МП визначаються їх виключно високою чутливістю. Такі перетворювачі застосовують для вимірювання тисків при малих прогинах пружного елемента, а також деформацій, прискорень, амплітуди вібрацій тощо.

9.4. Приклади практичного застосування МП

Найпоширеніші схеми МП, що застосовуються для вимірювань переміщень і зусиль, прискорень і кутів повороту, зображено на рис. 9.6 – 9.9.

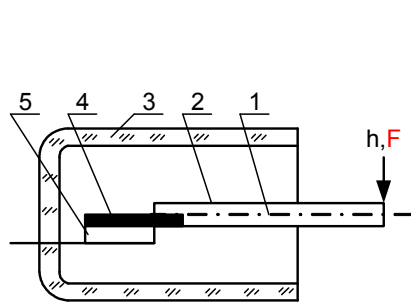


Рис. 9.6. Механотронний перетворювач переміщень та зусиль

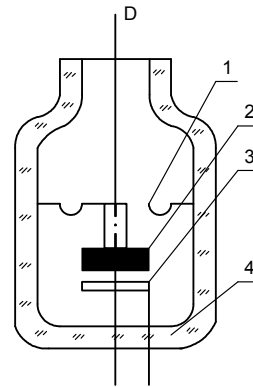


Рис. 9.7. Механотронний перетворювач тисків

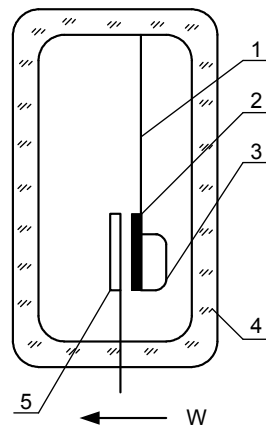


Рис. 9.8. Механотронний перетворювач прискорень

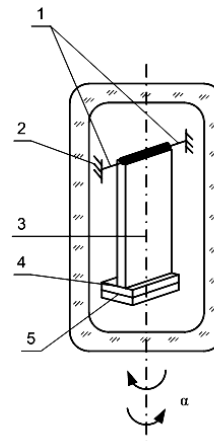


Рис. 9.9. Механотронний перетворювач кутів повороту

Одна з таких схем – кінематична схема МП переміщень і зусиль, що являє собою систему мембрана – стрижень (див. рис. 9.6).

Вхідний механічний сигнал (переміщення h або сила F) подається на зовнішній кінець штиря 1, впаяного в мембрану, яка є частиною герметичної оболонки МП. При цьому рухомий електрод-анод 4, закріплений на внутрішньому кінці штиря, переміщується відносно нерухомого катода 5, що спричиняє зміну анодного струму і вихідного сигналу перетворювача.

В механотронному перетворювачі тисків (манотроні), зображеному на рис. 9.7, під дією вимірюваного тиску мембрана 1 прогинається, в результаті чого виникає переміщення рухомого анода 2 відносно катода 3, жорстко пов'язаного з оболонкою 4 механотрона.

МП прискорень – акселерометри – прилади інерційного типу, відносне зміщення електродів в яких виникає за рахунок дії сил інерції. В механотронному акселерометрі (див. рис. 9.8) рухомий анод 2 разом з інерційною масою 3 закріплено на одному з кінців плоскої пружини 1. Другий кінець пружини жорстко пов'язаний з оболонкою 4 механотрона. Під час прискореного руху акселерометра (прискорення w) за рахунок дії сили інерції на масу 2 і анод 1 останній зміщується відносно катода 5.

В механотронному перетворювачі кутів повороту (див. рис. 9.9) масивний анод 4 через стрижень 3 закріплений на торсіонному підвісі 1, причому кінці торсіона пов'язані з оболонкою 2 механотрона. При повороті механотрона на кут α катод 5, жорстко з'єднаний з оболонкою 2, також повертається на кут α , а анод 4 лишається в початковому положенні, оскільки на нього діє сила ваги і закручування торсіона.

В результаті цього в механотроні відбуваються відносне зміщення анода і катода та відповідна зміна анодного струму і вихідного сигналу перетворювача.

Для вимірювання параметрів вібрацій використовують МП інерційного типу, аналогічні зображеному на рис. 9.8.

9.5. Контрольні питання до розділу 9

1. Механотронні перетворювачі. Конструкція.
2. Принцип дії МП. Застосування.
3. Основні розрахункові співвідношення МП. Переваги і недоліки МП.
4. Вимірювальні схеми МП.
5. Приклади застосування МП.

6. Диференційні МП, переваги і недоліки.
7. Основні вимоги до МП.

Розділ 10. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН В МЕХАНІЧНІ

До числа перетворювачів електричних величин в механічні (їх іноді називають зворотними) належать [16, 17, 43, 50, 51]: магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, індукційні перетворювальні пристрої. Розглянемо ці перетворювачі докладніше.

10.1. Магнітоелектричні перетворювачі (МЕ)

Принцип дії МЕ ґрунтується на виникненні зусилля або моменту при взаємодії електричного струму з постійним магнітним полем. Залежно від схеми вмикання вхідною фізичною величиною МЕ може бути струм або напруга, вихідною величиною – зусилля або момент сил, які спричинюють переміщення рухомої частини.

Залежно від того, яку конфігурацію має магніт, розрізняють МЕ із зовнішнім та внутрішньорамковим магнітом [16, 17, 43, 50, 51], а залежно від того, яка частина чутливого елемента рухома, розрізняють чутливі елементи з рухомою рамкою або з рухомим внутрішньорамковим магнітом.

Переваги МЕ: висока точність, великий момент обертання, який забезпечує високу чутливість, мале власне споживання потужності; лінійність характеристики. До недоліків МЕ можна віднести їх придатність для вимірювання лише постійного струму, а також відносну складність конструкції. Прагнення використати високі якості магнітоелектричного перетворювача дало поштовх до створення системи з перетворювачами змінного струму в постійний струм.

Магнітоелектричні перетворювачі широко застосовуються в електровимірювальній техніці та елементах автоматичних пристроїв. Так, їх використовують в гальванометрах різних типів, логометрах, моментних датчиках, підсумовуючих реле тощо.

Як приклад практичного застосування розглянемо роботу МЕ деяких найпоширеніших авіаційних приладів.

10.1.1. Магнітоелектричний гальванометр

На рис. 10.1 показано схему гальванометра, в МЕ якого застосовано зовнішній нерухомий магніт. Обертаючий момент, що діє на рухому систему – рамку, дорівнює, Г·см (рис. 10.2):

$$M = \frac{Bblw}{9810} = \frac{BISw}{9810} \approx 10^{-4} BISw, \quad (10.1)$$

де B – магнітна індукція, Гс [Тл]; l – довжина активної сторони рамки, см [м]; b – ширина рамки, см [м]; I – сила струму, А; w – число витків рамки; S – активна площа рамки, см² [м²].

В одиницях СІ обертаючий момент дорівнює, Н·м:

$$M = BISw.$$

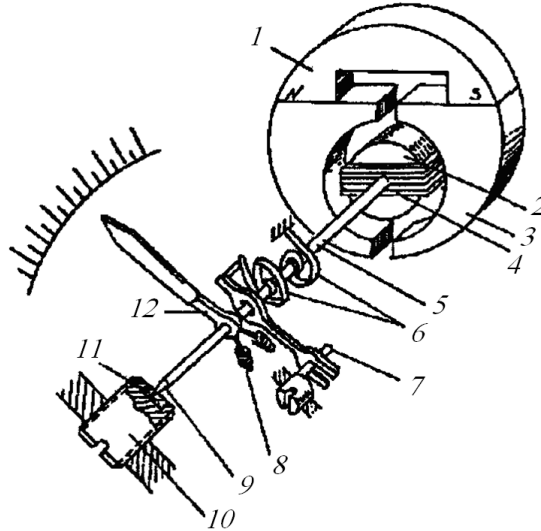


Рис. 10.1. Схема магнітоелектричного перетворювача електровимірювального приладу із зовнішнім нерухомим магнітом

Протидіючий момент створюється двома спіральними пружинками (волосинками) 6, які одночасно є струмовідводами рамки 4 (див. рис. 10.1). Протидіючий момент волосинок

$$M_{\text{пр}} = k\alpha,$$

де k – сумарна жорсткість пружин, Г·см/рад [Н·м/рад]; α – кут повороту рухомої системи, який визначається з умови рівності обертаючого і протидіючого моментів $M=M_{\text{пр}}$, рад:

$$\alpha = \frac{M}{k} \approx 10^{-4} \frac{BISw}{k}. \quad (10.2)$$

В одиницях СІ, рад,

$$\alpha = \frac{BISw}{k}.$$

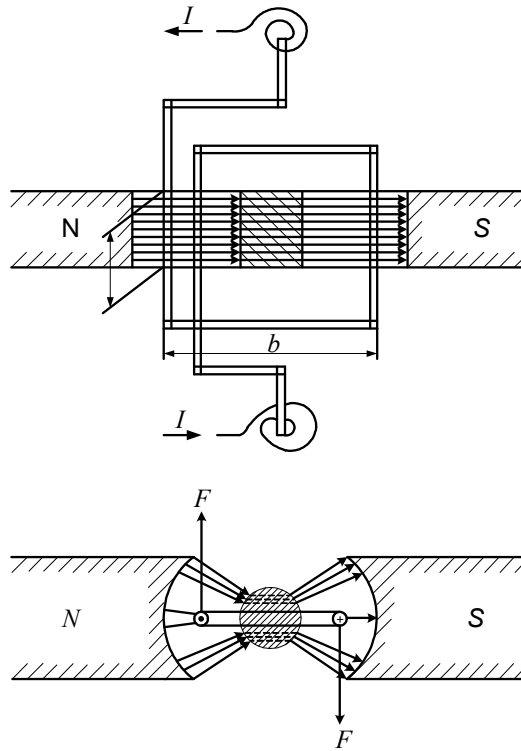


Рис. 10.2. Рухома рамка в радіальному магнітному полі

На рис. 10.3 показано схему МЕ, що застосовується в одній з конструкцій вольтамперметра. Магніт 2 циліндричної форми має поздовжній виріз по всій довжині циліндра, закріпленого

алюмінієвою обіймою 3 на залізному магнітопроводі 1 Г-подібної форми. До магніту з боку осердя 6 приклеєно залізну пластинку – полюсний наконечник 4, профілюючи який, змінюють активну довжину рамки таким чином, щоб забезпечити рівномірний характер шкали. Рамку 5 встановлено з одного боку від осі обертання 8. Сторона рамки, розміщена поблизу осі, не бере участі в створенні обертаючого моменту. Нижня сторона рамки обертається в повітряному зазорі і, взаємодіючи з полем постійного магніту, створює обертаючий момент. Інші сторони рамки працюють на потоках розсіювання.

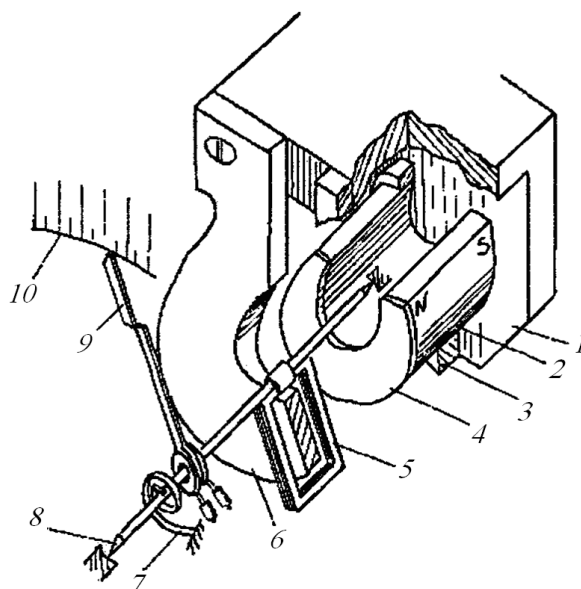


Рис. 10.3. Схема магнітоелектричного перетворювача з розміщенням рухомої рамки з одного боку

За наявності верхньої накладки спеціальної форми (рис. 10.4) в повітряному зазорі переміщуються три сторони рамки, що дає змогу дістати дещо більший обертаючий момент. Розмах шкали в такому приладі досягає 240° , що підвищує точність відліку. В тому разі, коли активними є одна вертикальна сторона рамки, віддалена на відстань R

від осі обертання, та дві горизонтальні сторони, то в (10.1) замість величини $b \cdot l$ має бути $lR + 2l(R - l/2)$.

Другий доданок враховує обертаючий момент, який розвиває горизонтальна сторона рамки, коли l – її активна довжина.

Повний обертаючий момент, що діє по всій активній довжині рамки, дорівнює, Н·м:

$$M = BIw \left[lR + 2e \left(R - \frac{e}{2} \right) \right]. \quad (10.3)$$

Щоб дістати потрібний закон розподілу індукції в зазорі, застосовують полюсні наконечники (див. рис. 10.1), профільовані кільця, в які вставлено магніт циліндричної форми, тощо.

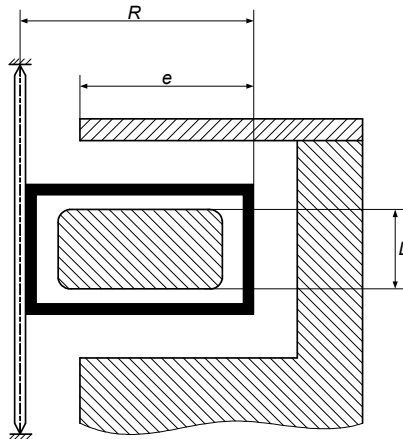


Рис. 10.4. Схема магнітоелектричного перетворювача з розміщенням трьох боків рамки в повітряному зазорі

10.1.2. Магнітоелектричні логометри

Логометрами називають прилади, які вимірюють відношення струмів або фізичних величин, функціонально пов'язаних з вимірюваним відношенням струмів. Основна перевага логометрів порівняно з гальванометрами – незалежність їх показів від коливань напруги живлення в певних межах, практично до 10% номінального значення. В логометрах всіх систем протидіючий момент створюється електричною пружиною.

В авіаційних приладах найбільшого поширення набули логометри з магнітоелектричними чутливими елементами двох типів: з рухомими рамками і нерухомим зовнішнім або внутрішньорамковим магнітом; з рухомим внутрішньорамковим магнітом. За числом рамок (котушок), що беруть участь в створенні моментів, розрізняють логометри дво- та трикотушкові і відповідно дво- та тримоментні.

Логометри з рухомими рамками. Роль протидіючої пружини в них виконує одна з рамок рухомої системи. Момент однієї з рамок направлений протилежно моменту, що створюється другою рамкою, і залежить від кута повороту рухомої системи. Ця залежність звичайно досягається розміщенням рамки в полі з індукцією в повітряному зазорі, що змінюється за кутом повороту активної довжини рамки. Положення рівноваги (величини кута відхилення рухомої системи) визначають рівністю обертаючого та протидіючого моментів (рис. 10.5). При цьому обертаючим умовно називають момент, який спричиняє переміщення рухомої системи в напрямку руху годинникової стрілки. Ці моменти дорівнюють, Н·м:

$$M_1 = B_1 S_1 I_1 w_1; \quad M_2 = B_2 S_2 I_2 w_2,$$

де B_1, B_2 – індукції в зазорі, де розміщено витки рамок з, Тл; S_1, S_2 – активні площі, м²; I_1, I_2 – сила струму в рамках, А; w_1, w_2 – число витків рамок.

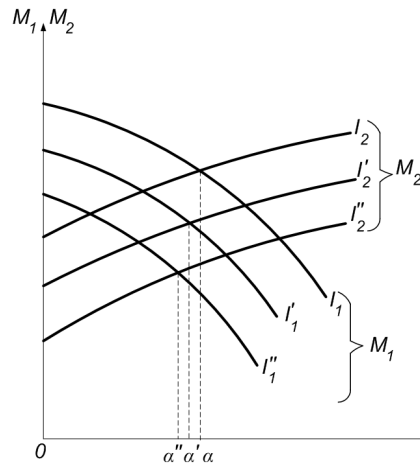


Рис. 10.5. Залежність обертаючого M_1 та протидіючого M_2 моментів від кута α повороту рухомої системи

При рівновазі рухомої системи (нехтуємо тертям в опорах)
 $M_1=M_2$:

$$B_1 S_1 I_1 w_1 = B_2 S_2 I_2 w_2.$$

При $w_1=w_2=w$

$$B_1 S_1 I_1 = B_2 S_2 I_2$$

або

$$\frac{B_1 S_1}{B_2 S_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Із останнього рівняння випливає, що при сталих значеннях S_1 і S_2 для роботи системи необхідно, щоб індукція в зазорі була змінною і залежала від повороту рухомої системи.

Якщо $S_1=S_2=S$, то

$$\frac{B_1(\alpha)}{B_2(\alpha)} = \frac{I_2}{I_1}.$$

За сталої індукції в зазорі змінюється відношення S_1/S_2 залежно від кута повороту рамок. Так, при $B_1=B_2=B$ має виконуватися умова

$$\frac{S_1(\alpha)}{S_2(\alpha)} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Розв'язуючи здобуті рівняння відносно α , визначаємо кут відхилення рухомої системи, коли вона перебуває в рівновазі:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

На рис. 10.6 показано магнітоелектричний логометр, в якому полюсним наконечникам надано спеціальної форми, а рамки 4 розміщені з одного боку від осі обертання рухомої системи. Конструкція забезпечує великий кут розмаху шкали (до 240° і більше). Величини моментів, що діють на рамки 4, залежать від їх розміщення відносно полюсних наконечників 2 і 3, висота яких змінюється за певним законом. При повороті рамки в рівномірному повітряному зазорі також змінюватиметься їх активна довжина. На рис. 10.6 також позначено: 1 – магніт, 5 – вузол стрілки.

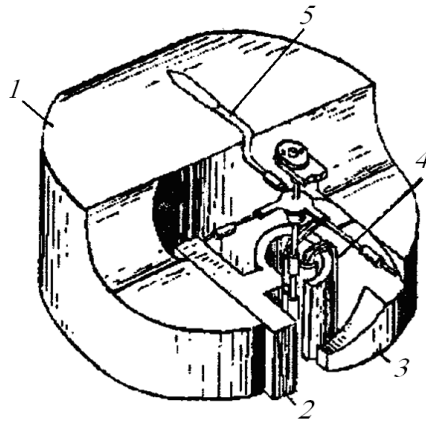


Рис. 10.6. Логометр з кутом шкали 240°

На рис. 10.7, а зображено логометр з внутрішньорамковим магнітом 1 і рухомими рамками 3, розміщеними під кутому одна до одної. На рис. 10.7 позначено: 2 – магнітопровід, 4 – струмопідвідні пружини; 5 – профільоване кільце. Магніт 1 має циліндричну форму і намагнічений вздовж свого діаметра. Індукція в зазорі такої магнітної системи змінюється за синусоїдальним законом. Тоді в зоні зазору, яка збігається з нейтраллю магніту, індукція дорівнює нулю, а в зоні, розміщеній по довжині полюсів магніту, індукція досягає найбільшого свого значення B_m . Беручи за початок відліку лінію I-I нейтралі (рис. 10.7, б), запишемо для індукції B в довільному місці зазору

$$B = B_m \sin \alpha . \quad (10.4)$$

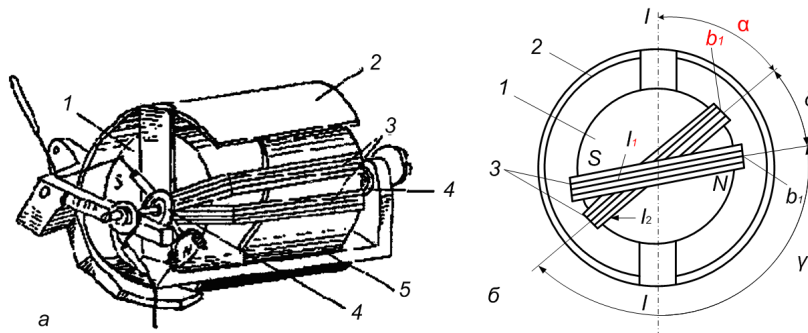


Рис. 10.7. Логометр з внутрішньорамковим магнітом (а) і рухомими рамками (б)

Кут повороту рухомої системи

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\sin \gamma}{\frac{I_1}{I_2} + \cos \gamma}. \quad (10.5)$$

За рівнянням (10.5) можна розрахувати шкалу логометра. Формула ця також означає, що його покази залежать від відношення струмів.

Відомі інші численні конструкції логометрів з рухомими рамками. Так, в логометрах, що застосовуються в авіаційних паливомірах, рамки рухомої системи розміщені одна під одною.

Логометр з рухомим магнітом (рис. 10.8). Логометр складається з двох пар нерухомих рамок 3 і 5, між якими проходить вісь 6 рухомої системи, яка складається з рухомого магніту 1 та стрілки 7. Рамки розміщені під певним кутом одна до одної, який дорівнює 90 або 120°. Вся система закріплена всередині пермалоевого кільцевого магнітопроводу 4, який також охороняє логометр від впливу зовнішніх магнітних полів.

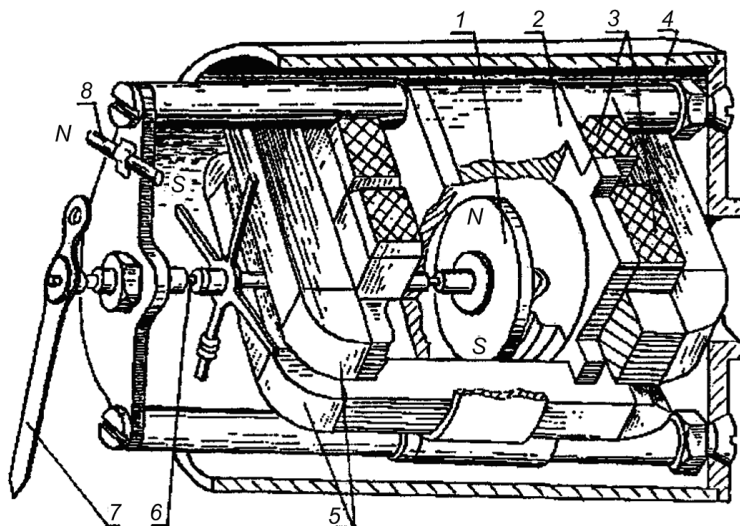


Рис. 10.8. Конструкція логометра з рухомим магнітом

Рухомий магніт 1 оточений нерухомим мідним стаканом 2, який відіграє роль заспокоювача. Невеликий нерухомий магніт 8 призначено для повернення стрілки 2 на нуль. Рухомий магніт за відсутності інших моментів (моменту тертя тощо) встановлюється за напрямком результуючого магнітного поля H обох рамок (рис. 10.9).

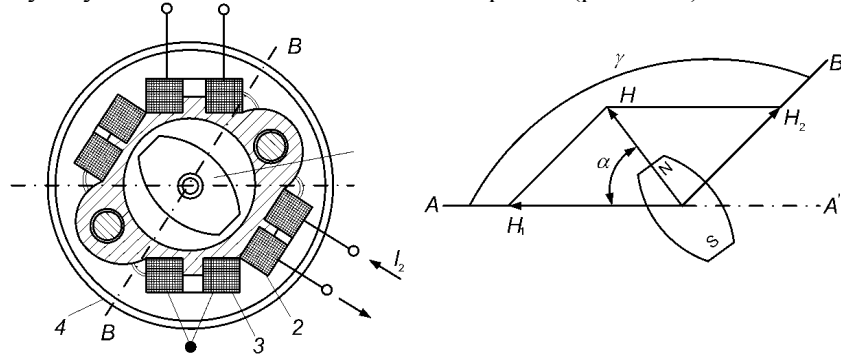


Рис. 10.9. Логометр з рухомим магнітом

На рис. 10.9 позначено: 1 – магніт; 2 і 3 – рамки; 4 – магнітопровід. Для спрощення розрахунку вважають, що магнітні поля H_1 та H_2 , що створюються кожною парою рамок, однорідні і направлені по осях AA' і BB' . Кут повороту рухомого магніту, закріпленого на одній осі з стрілкою логометра, наближено визначають за формулою

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\sin \gamma}{\frac{I_1}{I_2} + \cos \gamma}, \quad (10.6)$$

де α – кут, що відлічується від лінії AA' , на який розміщено нуль шкали; I_1, I_2 – струми, що протікають по рамках 3 і 5 логометра.

При виведенні формул (10.5) і (10.6) не враховано момент від постійного магніту, що повертає стрілку на нуль, і моменти тертя, наявність яких вносить невеликі похибки в роботу логометрів.

В деяких приладах застосовують трикотушкові логометри з рухомим магнітом. Схему таких логометрів показано на рис. 10.10. Частіше котушки розміщують під кутом 120° одна до одної. Котушки 4 розміщені на кільцевому осерді 3, набраному з пластинок магнітомякого матеріалу. Круглий рухомий магніт 1 розміщено всередині демп-

фуючого алюмінієвого стакану 2. Зовні логометр екранують від зовнішніх магнітних полів стаканом 5 з м'якого заліза.

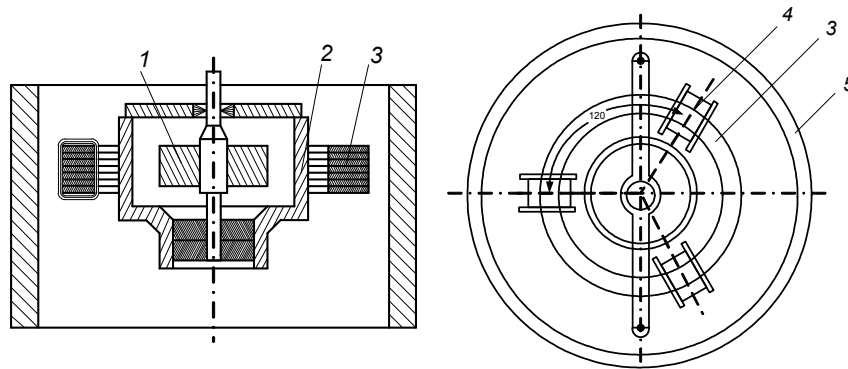


Рис. 10.10. Схема трикотушкового логометра

Перевага трикотушкових логометрів — це можливість повороту рухомого магніту залежно від співвідношення струмів в котушках на кут до 360° і більше, що потрібно для роботи ряду дистанційних передач з логометричними приймачами.

10.1.3. Магнітоелектричні силові елементи

Магнітоелектричні силові елементи призначені для створення зусилля або обертаючого моменту, пропорційного до сили струму. На рис. 10.11 зображено конструкцію елемента, в якому ротор виконаний у вигляді шестиполюсного постійного магніту, а обмотка статора складається з шести котушок. Схему з'єднання котушок показано на рис. 10.12 (де 1 – ротор; 2 – котушки; 3 – корпус статора).

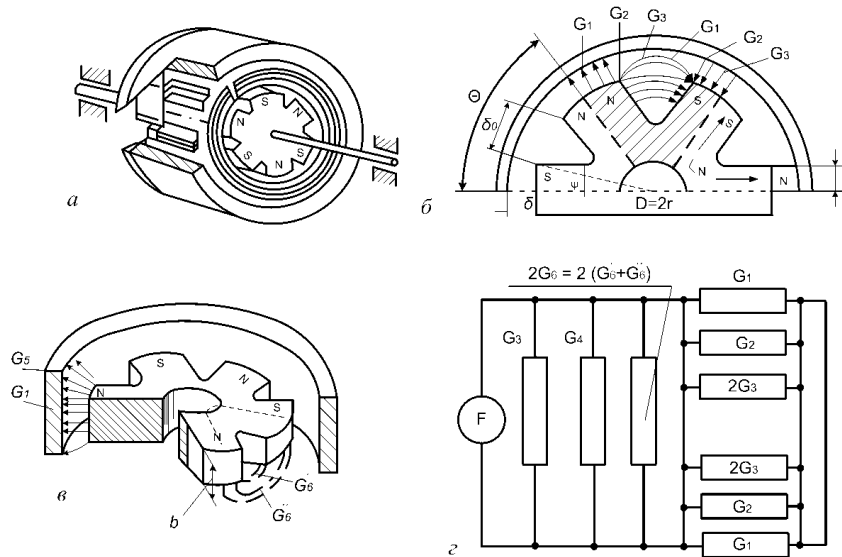


Рис. 10.11. Магнітоелектричний силовий перетворювач:
 а – загальний вигляд елемента; б, в – схеми розподілу магнітних потоків; г – схема заміщення магнітного кола)

Обертаючий момент, що діє на рухомі котушки, дорівнює, Г·см:

$$M_{об} = \frac{BI \cdot 2\rho lwr}{9810}, \quad (10.7)$$

де B – індукція в повітряному зазорі, Гс [Тл]; I – сила струму, А; ρ – число пар полюсів магніту; l – довжина активної сторони рамки, см [м]; w – число витків рамки; r – відстань від осі обертання до активної сторони рамки, см [м].

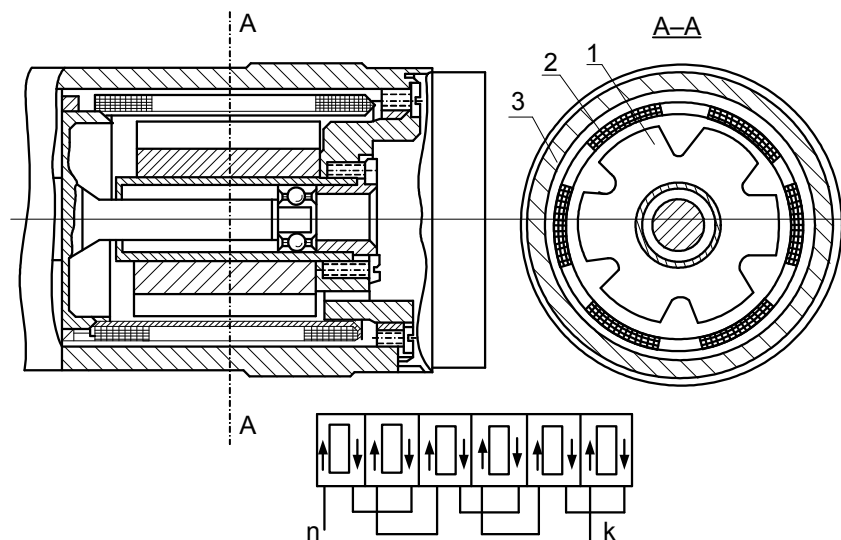


Рис. 10.12. Конструкція магнітоелектричного силового перетворювача та схема з'єднання його котушок

В одиницях СІ обертаючий момент дорівнює, Н·м:

$$M_{об} = BI \cdot 4\rho lwr.$$

В тому разі, коли рухомою частиною є не котушки, а магніт, його роблять не масивним, а невеликої товщини, щоб зменшити момент інерції.

На рис. 10.13 зображено схему МЕ, що використовується для створення зусилля, пропорційного до струму, який підводиться до рухомої котушки. Магнітну систему 2 намагнічено так, що її поле замикається через робочий зазор, в якому вміщують котушку 1, закріплену на ковпачку 4. Останній має пружний підвіс, виконаний за допомогою двох тонких плоских мембран 3 з фігурними вирізами. Мембрани мають малу жорсткість в осьовому напрямі, вони допускають осьові переміщення котушки 1 і добре її центрують. В результаті взаємодії струму, підведеного до котушки з магнітним полем, створюється осьове зусилля P , яке втягує або виштовхує котушку.

Це зусилля використовується іншими частинами виробу, в який встановлюється даний магнітоелектричний елемент. Величину зусилля можна визначити за формулою

$$P = \frac{2\pi BIw}{9810},$$

де r – середній радіус котушки, см [м]; B – індукція в робочому зазорі, Гс [Тл]; I – сила струму в котушці, А; w – число витків котушки.

В одиницях СІ це зусилля дорівнює, Н:

$$P = 2\pi BIw \quad (10.8)$$

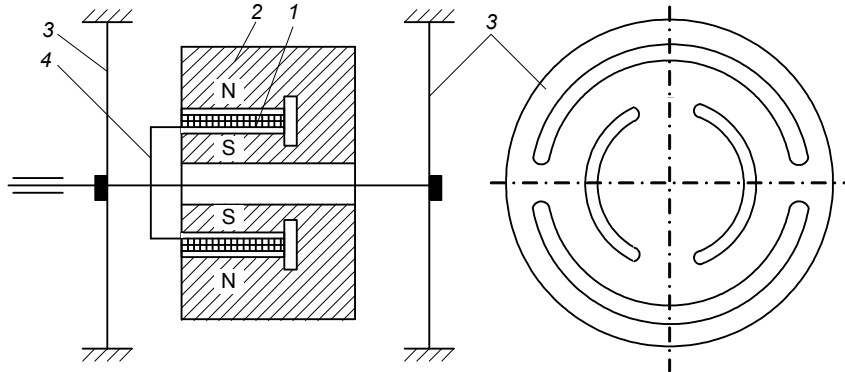


Рис. 10.13. Схема магнітоелектричного перетворювача з поступально рухомою котушкою

Дещо інше конструктивне оформлення подібної магнітоелектричної пружини зображено на рис. 10.14 (де 1 – магніт; 2 – котушка; 3 – важіль; 4 – вісь).

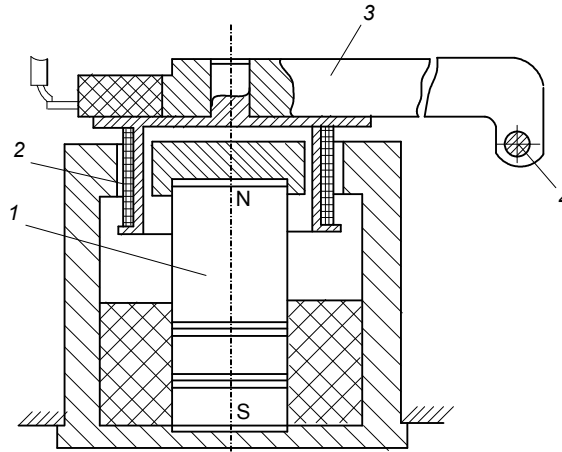


Рис. 10.14. Варіант конструкції магнітоелектричної пружини

Рухома котушка 2 пов'язана з важелем 3, який повертається на невеликі кути навколо осі 4. Замість постійного магніту можна застосувати котушку підмагнічування, щоб створити магнітне поле в зазорі. Застосування постійного магніту забезпечує стабільнішу індукцію в зазорі.

10.2. Електромагнітні перетворювачі (ЕП)

Для вимірювання та перетворення керуючого електричного сигналу (струму, напруги) в переміщення або в зусилля застосовують також електромагнітні перетворювачі. Вони звичайно складаються з двох котушок і осердя з феромагнітного матеріалу. Струми, що протікають по котушках, створюють магнітне поле, яке намагнічує осердя. Взаємодія магнітних полів осердя та котушок приводить до появи зусилля, яке переміщує осердя. Останнє намагається зайняти таке положення, щоб через нього проходило найбільше число силових ліній. Електромагнітний перетворювач може працювати як на постійному, так і на змінному струмі.

Якщо в одній котушці (котушці збудження) струм I_1 підтримувати незмінним, а постійний струм I_2 , що подається в іншу котушку (котушку керування), змінювати або за величиною, або за напрямом, то можна отримати три лінійні залежності між керуючим струмом I_2 , переміщенням x осердя ротора, моментом (зусиллям) M_p , що діє на осердя, та відновлюючим моментом M_b , який виникає при відхиленні осердя зовнішніми силами, тобто при $I_1 = \text{const}$ можна отримати такі залежності:

- якщо нерухоме осердя ($x=0$), то $M_p = k_1 I_2$;
- за відсутності моменту M_p ($M_p=0$) $x = k_2 I_2$;
- за відсутності сигналу I_2 ($I_2=0$) $M_b = k_3 x$.

Електромагнітний перетворювач, що застосовується в системі корекції гіроскопічних приладів для перетворення електричного сигналу в коригуючий момент, показано на рис. 10.15 (де 1 – ротор; 2 – залізо статора; 3, 4 – котушки; 5 – щітка потенціометра). Котушки 3 і 4 ввімкнені за диференційною схемою, як це показано на рис. 10.15, б. Коли в котушках 3, 4 протікають рівні за величиною струми $I_1 = I_2$, то на ротор 1, що займає нейтральне положення, моменти не діють ($M_p = 0$).

Коли система корекції відхиляє щітку 5 потенціометра від середнього положення, то рівність між струмами I_1 і I_2 порушується, і на

ротор починає діяти результуючий момент, величина і знак якого визначаються величиною та напрямом відхилення щітки потенціометра. За такої схеми вмикання результуючий момент пропорційний до різниці квадратів струмів в котушках 3, 4.

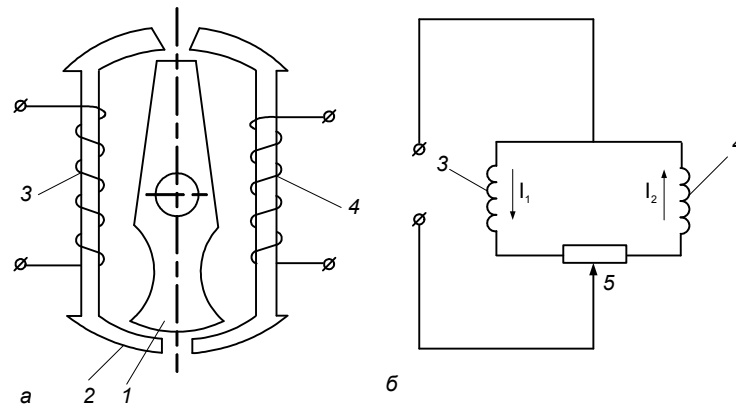


Рис. 10.15. Електромагнітний перетворювач: а — схема перетворювача; б — схема вмикання котушок перетворювача

На рис. 10.16 показано схему ЕП з нерухомими котушками та рухомим якорем, що застосовується в підсилювачах рульових машин. За знеструмленої керуючої котушки 2 ($I_2=0$) і наявності струму в котушці збудження 3 ($I_1 \neq 0$) яркір 1 перебуватиме в стійкому середньому положенні. Потіки Φ_1 і Φ_2 в робочих зазорах при цьому рівні і протилежно направлені; потік в середньому магнітопроводі (роторі) відсутній; в разі відхилення ротора від середнього положення, на нього діятиме відновлюючий момент $M_{\text{в}}$, пропорційний куту відхилення від середнього положення. Величина відновлюючого моменту залежить від вибору зазорів Δ і δ , а також від числа ампер-витків котушки збудження 3.

Коли сигнал буде подано в котушку керування, по ротору потече магнітний потік $\Phi_{\text{у}}$. Якщо потік $\Phi_{\text{у}}$ направлений, наприклад, вгору, як це показано на рис. 10.16, а, то в лівому повітряному зазорі він віднімається від потоку Φ_1 , а в правому – підсумовується з потоком Φ_2 . В результаті індукція в правому повітряному зазорі збільшиться, а в лівому зменшиться. Яркір повернеться за напрямом годинникової стрілки. При цьому площа правого повітряного зазору збільшиться, а ліво-

го – зменшиться. Коли індукція в обох повітряних зазорах стане однаковою, поворот якоря припиниться.

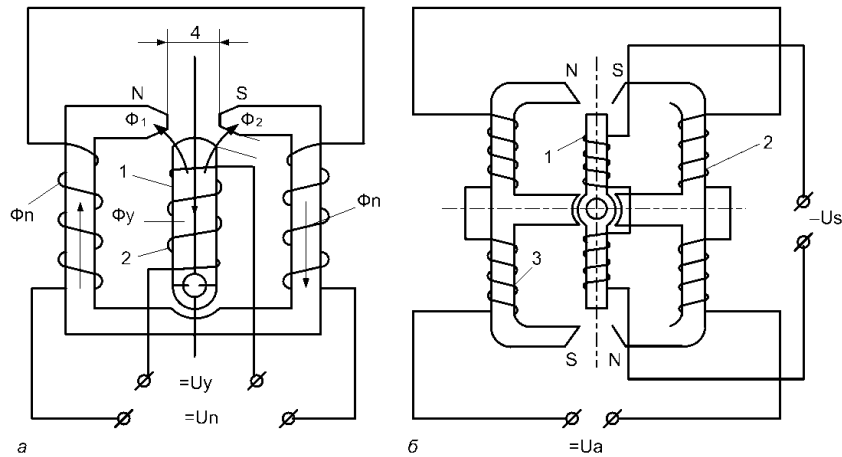


Рис. 10.16. Схема електромагнітного перетворювача: несиметрична (а) та симетрична (б) конструкції

Надаючи полюсним наконечникам відповідної форми, можна отримати лінійну залежність тягового зусилля від кута повороту ротора. Діапазон відхилення ротора невеликий і становить $1...2^\circ$. Відомі конструкції ЕП з кутом повороту до 90° і більше.

На рис. 10,16, б показано варіант конструкції ЕП симетричної форми, який характеризується більшою чутливістю і має збалансовану рухому частину.

10.3. Електро- та феродинамічні перетворювачі

Перетворювачі, що основані на взаємодії струму, який протікає в котушці керування, з магнітним потоком, який створюється в повітряному зазорі котушкою підмагнічування, називають електродинамічними (ЕД). За таким самим принципом працюють і феродинамічні перетворювачі (ФД), в яких для зменшення магнітного опору і збільшення в зв'язку з цим сил взаємодії одну з котушок розміщують на осерді з феромагнітного матеріалу.

Робота електродинамічних і магнітоелектричних перетворювачів з рухомою рамкою є подібною: в обох системах обертаючий момент створюється взаємодією струму, що протікає в рухомій рамці, з магні-

тним потоком, що створюється в магнітоелектричній системі постійним магнітом, а в електродинамічній системі – струмом, який протікає по нерухомій котушці. ЕД перетворювачі можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмі. Їх широко застосовують в багатьох електровимірювальних приладах змінного струму, у вимірювальних пристроях, в яких потрібно перетворювати струм, напругу, потужність в зусилля або в обертаючий момент, що спричиняє переміщення рухомої рамки. За видом руху цієї рамки розрізняють електродинамічні перетворювачі з керуючою рамкою, яка переміщується поступально, та з поворотною рамкою. Схему ФД перетворювача, в якій рамка набуває поступального переміщення, зображено на рис. 10.17.

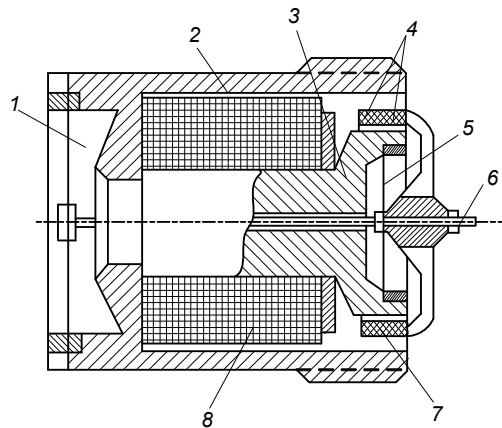


Рис. 10.17. Схема феродинамічного перетворювача з рамкою, що переміщується поступально

Перетворювач складається з осердя 3 і корпусу 2, магнітопроводу 4 з кільцевим повітряним зазором, котушки збудження 8, керуючої рамки 7, осі 6 і двох протидіючих пружин 1 і 5. Постійний струм, що протікає по котушці підмагнічування, створює в робочому повітряному зазорі 4 радіальний магнітний потік. Під час пропускання струму по керуючій рамці 7 в результаті взаємодії струму в рамці з магнітним потоком в кільцевому повітряному зазорі виникає електромагнітне зусилля, яке переміщує рухому рамку з вихідною віссю 6. В момент врівноважування цього зусилля зусиллям, яке розвивається протидіючими пружинами 1 і 5, рух рамки 7 припиняється. Зусилля, яке діє на рухому рамку, визначають за формулою, подібною (10.8). Значення

індукції в робочому зазорі знаходять в результаті розрахунку магнітного кола. Після визначення потоку Φ_p в робочому зазорі за формулою

$$B_p = \frac{\Phi_p}{S_p}$$

обчислюють індукцію B_p .

На рис. 10.18 показано схеми ФД з поворотною рамкою (де 1 – рамка; 2, 3 – магнітопроводи; 4 – котушка збудження). На рис. 10.18, а плоска рамка 1 розміщена в зазорі магнітопроводу 2, на якому розташовано дві котушки збудження 4. Постійний струм, що протікає по них, створює постійну за величиною індукцію в робочому зазорі магнітопроводу. Обертаючий момент, що діє на рамку під час пропускання по ній струму I , дорівнює, г·см:

$$M = \frac{B I l w r}{9810}, \quad (10.9)$$

де B – індукція в робочому зазорі, Гс [Тл]; I – сила струму, А; l – активна довжина рамки, см [м]; w – число витків рамки; r – радіус обертання рамки, см [м]. В одиницях СІ, Н·м:

$$M = B I l w r.$$

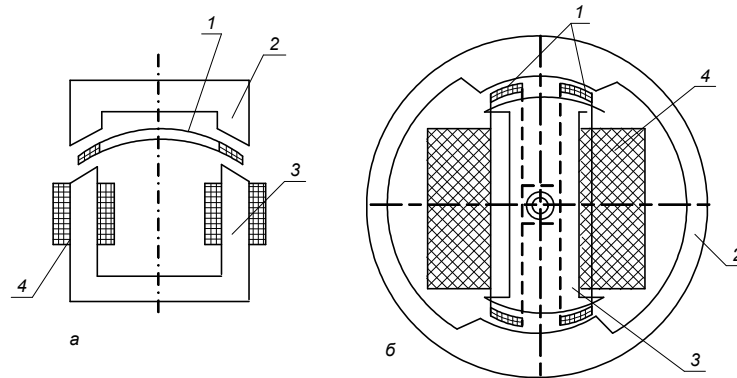


Рис. 10.18. Схема феродинамічного перетворювача з поворотною рамкою: несиметрична (а) та симетрична (б) конструкції

Під час розрахунку такого перетворювача беруть до уваги, що потрібний переріз магнітопроводу залежить від матеріалу, що застосову-

ється. Для зменшення перерізу доцільно використовувати електротехнічну сталь, яка характеризується великою індукцією насичення. Коли потрібний малий гістерезис, магнітопроводи доводиться виготовляти з сплавів типу пермалой, хоча їх індукція насичення нижча, ніж у сталі.

Як випливає з формули (10.9), величина моменту M залежить від струму i , що протікає в рамці, і струму i_1 , що протікає в обмотці збудження і створює індукцію B в зазорі. Тому такий перетворювач можна використовувати для перемноження двох величин, які вводяться у вигляді струмів i та i_1 , оскільки величина моменту M пропорційна добутку $i \times i_1$.

Щоб усунути вплив сили ваги та прискорень на рухому рамку, застосовують симетричну конструкцію перетворювача (рис. 10.18, б).

Феродинамічний гальванометр. Схему однієї з конструкцій феродинамічного гальванометра показано на рис. 10.19 (де 1 – сектор заспокоювача; 2 – півосі; 3 – спіральні пружини (волосинки); 4 – стрілка; 5 – магнітопровід (яро); 6 – нерухома котушка; 7 – рухома рамка; 8 – циліндричне осердя; 9 – магніт заспокоювача).

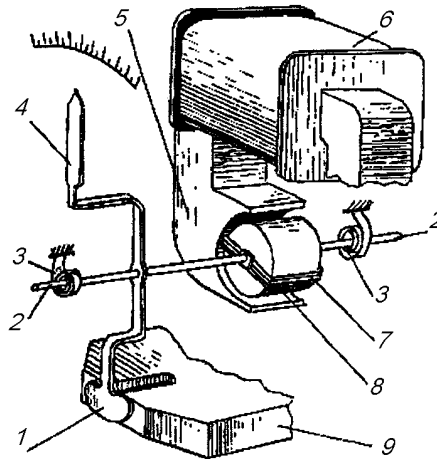


Рис. 10.19. Схема феродинамічного гальванометра

Нерухома котушка 6 служить для створення магнітного потоку в зазорі, де обертається рухома рамка (котушка) 7. Нерухома котушка надіта на магнітопровід 5, набраний з фігурних штампованих пластин електротехнічної сталі Э4А товщиною приблизно 0,2 мм. Така конструкція магнітопроводу зменшує витрати від вихрових струмів. Безкаркасна рухома рамка може вільно обертатися на двох півосях-кернях 2 з твердої кобальто-вольфрамової сталі навколо нерухомого осердя 8, зібраного з штампованих круглих пластин електротехнічної сталі Э4А товщиною 0,5 мм. Циліндрична форма осердя і радіальна форма полюсів магнітопроводу забезпечують рівномірне радіальне магнітне поле в зазорі, де обертається рамка. Струмopідводами до рамки є спіральні пружини 3, які створюють одночасно протидіючий момент $M_{\text{пр}}$.

Введення в систему магнітопроводу з магнітом м'якого матеріалу дало змогу отримати великі обертаючі моменти при порівняно малих розмірах системи; водночас вплив зовнішніх магнітних полів на точність показань чутливого елемента значно зменшується.

Перетворювач стійко працює в умовах вібрації та тряски. Проте введення магнітопроводу приводить до появи інших похибок (від гістерезису, вихрових струмів), внаслідок чого точність феродинамічних перетворювачів нижча, ніж електродинамічних.

Обертаючий момент, що діє на рухома рамку, вміщену в однорідне магнітне поле

$$M = C_1 I_1 I_2, \quad (10.10)$$

де C_1 – коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів (числа витків, геометричних розмірів тощо); I_1, I_2 – струми, що протікають в котушці та рамці.

З (10.10) бачимо, що обертаючий момент залежить від добутку струмів і що за одночасної зміни напрямку струмів I_1 і I_2 напрям обертаючого моменту не зміниться. Звідси випливає, що електродинамічні перетворювачі можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмі.

З умови, рівноваги рухомої частини ($M=M_{\text{пр}}$) можна знайти кут її повороту:

$$\alpha = \frac{C_1}{k_{\text{пр}}} I_1 I_2 = C I_1 I_2. \quad (10.11)$$

Під час вимірювання цими приладами напруги, а також малих (до 0,5 А) струмів рухома і нерухома котушка вмикаються послідовно, тому

$$I_1 = I_2 = I, \quad (10.12)$$

$$\alpha = C I^2, \quad (10.13)$$

тобто шкала приладу квадратична.

Якщо струм змінний і струми в котушках не збігаються за фазою, то вираз для кута набере такого вигляду:

$$\alpha = C I^2 \cos \psi, \quad (10.14)$$

де I – діюче значення змінного струму; ψ – кут зсуву фаз між струмами двохобмоток.

Даний ФД перетворювач (див. рис. 10.19) може бути використаний як електрична пружина. В цьому разі рухома рамку підключають до невеликого опору (R_1, x_1). До котушок збудження 1 (рис. 10.20) підводиться напруга постійної амплітуди та частоти. Коли рамка 2 перебуває в нейтральному положенні (на лінії 0–0), в її витках не наводиться ЕРС і момент дорівнює нулю. В разі відхилення рамки від нейтрального положення індукована в ній ЕРС і момент залежать від величини кута α повороту рамки.

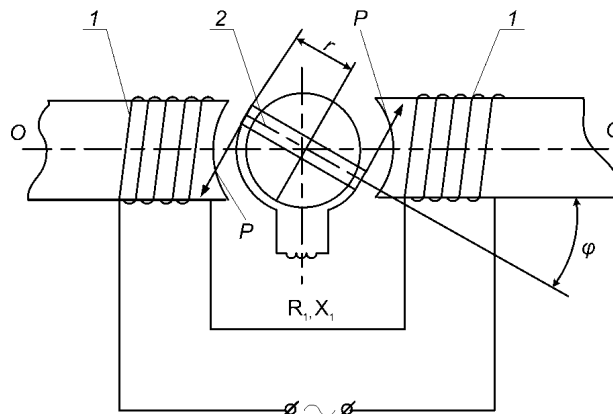


Рис. 10.20. Варіант схеми феродинамічної електричної пружини

Середнє значення моменту, що розвивається рамкою такої електричної пружини, дорівнює, Н·м:

$$M_{cp} = \frac{w_p^2 B_m^2 S_p^2 \omega_0 \sin \alpha}{z_p} \sin \varphi, \quad (10.15)$$

де w_p – число витків в рамці; B_m – амплітудне значення індукції в повітряному зазорі, Тл; S_p – площа рамки, м²; $\omega_0 = 2\pi f$, f – частота змінного струму, що підводиться до котушки 1, Гц; $\alpha = \arctg(x_p/R_p)$ – кут зсуву фаз між індукованою в рамці ЕРС і струмом i_p ; x_p , R_p – опори кола рамки; φ – кут повороту рамки, рад.

Замінімо $\sin \alpha$ через x_p/z_p і зважимо на те, що для малих кутів $\sin \varphi \approx \varphi$. Тоді, підставляючи в (10.15) ефективне значення індукції B і враховуючи, що обидві сторони рамки активні, отримуємо

$$M_{cp} = \frac{2w_p B_m^2 S_p^2 \omega_0 x_p \varphi}{z_p^2} = k_{np} \varphi, \quad (10.16)$$

де k_{np} – коефіцієнт жорсткості електричної пружини.

Крутний момент змінюється із зміною співвідношення між R_p та x_p і набуває максимального значення при $R_p = x_p$. Тому іноді для збільшення моменту рамку замикають на індуктивність, добираючи її значення так, щоб виконувалася рівність $R_p = x_p$.

Приклад розрахунку зворотного перетворювача електродинамічного типу.

Визначити момент, що діє на рамку ЕД перетворювача, показаного на рис. 10.18, а, за такими даними: площа перерізу магнітопроводу по всій довжині стала, а саме $S = 9 \text{ мм}^2$ ($9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$); магнітопровід виготовлено зі сталі Э41; площу перерізу S_n повітряного зазору взяти такою, що дорівнює площі перерізу магнітопроводу, загальна довжина середньої лінії магнітної індукції $l_m = 66 \text{ мм}$ ($66 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); загальну активну довжину двох сторін рамки взяти $l = 6 \text{ мм}$ ($6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); довжина повітряного зазору $\delta = 2,2 \text{ мм}$ ($2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). Кожна котушка збудження містить 4400 витків і по них пропускається струм 0,05 А; рамка має 800 витків, струм в рамці 0,008 А; радіус r обертання рамки дорівнює 30 мм ($30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). Розрахунок виконати наближено, не враховуючи потоків розсіяння.

Розв'язання. 1. Визначимо магніторушійну силу:

$$F = I_w = 0,05 \cdot 2 \cdot 4400 = 440 \text{ А.}$$

2. Щоб знайти потік Φ при даному значенні магніторушійної сили, спершу побудуємо графік функції $\Phi=f(F)$ для різних значень потоків, якими будемо задаватися. Візьмемо, наприклад, $\Phi=9 \cdot 10^{-7}$ Вб. Оскільки магнітопровід має сталий переріз, індукція в кожній його ділянці має одне і те ж саме значення:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{9 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-6}} = 0,1 \text{ Тл.}$$

Такої самої величини буде індукція в зазорі, оскільки площа перерізу зазору дорівнює площі перерізу магнітопроводу. За кривими намагнічування, показаними на рис. 7.2, знаходимо, що в магнітопроводі при $B=0,1$ Тл напруженість $H_M=1$ А/м. Напруженість магнітного поля в зазорі

$$H_3 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,1}{4 \cdot 10^{-7}} = 79550 \text{ А/м}$$

Магніторушійна сила

$$F = H_M l_M + H_3 \delta = 1 \cdot 66 \cdot 10^{-3} + 79550 \cdot 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 350,086 \text{ А.}$$

Як бачимо, ця сила менша за обчислену в п. 1. Виконаємо розрахунки при великих потоках Φ і дані зведемо в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Дані для розрахунку МРС

Φ , Вб	H_M , А/м	H_3 , А/м	F , А
$9 \cdot 10^{-7}$	1	79550	350,07
$18 \cdot 10^{-7}$	1,1	159100	700,1
$14 \cdot 10^{-7}$	1	123300	542,59

За отриманими даними будуємо графік $\Phi=f(F)$ (рис. 10.21) і за ним знаходимо робочу точку, яка при $F=440$ А відповідає магнітному потоку $\Phi=11,4 \cdot 10^{-7}$ Вб.

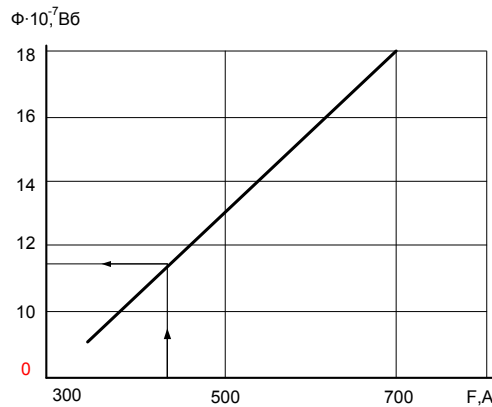


Рис. 10.21. Дані для розрахунку феродинамічного перетворювача

Визначимо індукцію в повітряному зазорі:

$$B_3 = \frac{\Phi}{S} = \frac{11,4 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-6}} = 0,127 \text{ Тл.}$$

4. За формулою (10.9) знайдемо момент, що діє на рамку:

$$M = Bilwr = 0,127 \cdot 0,008 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1,46 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ або } M = 1,49 \text{ г} \cdot \text{см.}$$

Приклад розрахунку феродинамічного перетворювача.

Визначити, який струм має бути пропущений через котушки збудження 4 перетворювача (див. рис. 10.18, а) для створення моменту на рамку в 2 г·см ($1,96 \cdot 10^{-4}$ Н·м). Потрібні дані див. ву прикладі 10.3.1.

Розв'язання. 1. З (10.9) визначимо величину індукції в зазорі:

$$B_3 = \frac{M}{Ilwr} = \frac{1,96 \cdot 10^{-4}}{0,008 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot 30 \cdot 10^{-3}} = 0,17 \text{ Тл.}$$

2. Обчислимо напруженість магнітного поля в повітрі:

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = \frac{0,17}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 135000 \text{ А/м.}$$

3. Оскільки згідно умов задачі індукції в зазорі та магнітопроводі однакові, то по графіку намагнічування (див. рис. 7.2) знаходимо, що індукції $B=0,17$ Тл відповідає напруженість магнітного поля $H_M=1$ Н/м.

4. Загальна магніторушійна сила

$$F = H_m I_m + H_3 2\delta = 1 \cdot 66 \cdot 10^{-3} + 135000 \cdot 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 594,07 A.$$

5. Струм в котушках збудження

$$I = \frac{F}{w} = \frac{594,07}{2 \cdot 4400} = 0,0655 A.$$

10.4. Індукційні перетворювачі (ІІ)

Індукційні перетворювачі з використанням вихрових струмів в провідних тілах складаються з двох основних частин:

1) нерухомих електромагнітів або обертових постійних магнітів для створення змінних обертових магнітних полів;

2) струмопровідного рухомого елемента, що має форму диска або циліндра і розміщений в зоні обертового магнітного поля, яке наводить в елементі вихрові струми.

Взаємодія цих струмів з обертовим магнітним полем спричиняє появу обертаючого моменту, який приводить в рух рухомий елемент. За відсутності протидіючого моменту струмопровідний елемент виконуватиме безперервне обертання. Саме за таким принципом і працюють двофазні індукційні двигуни (ІІД), що широко застосовуються в сучасних авіаційних приладах і автоматичних пристроях. За наявності протидіючого моменту, який, наприклад, розвиває спіральна пружина, рухомий елемент повернеться на кут, при якому обертаючий момент врівноважується протидіючим моментом. Для виготовлення струмопровідного елемента використовують матеріали з малим питомим електричним опором (мідь або алюмінієво-марганцевисті сплави). Останні мають ще і невеликий температурний коефіцієнт α електричного опору, що значно знижує температурні похибки.

На рис. 10.22 показано схеми індукційних перетворювачів, що застосовуються в авіаційних тахометрах для вимірювання частоти обертання вала, в заспокоювачах для гасіння коливань рухомої системи приладів, в деяких пристроях для передавання обертання з одного вала на другий без їх жорсткого механічного зв'язку. Магніти приводяться в обертання з швидкістю, що дорівнює або пропорційна до швидкості, яка має бути виміряна. Протидіючий момент в приладі створюється спіральною пружиною. Магнітний вузол (рис. 10.22, а, де 1 – струмопровідний елемент; 2 – постійні магніти; 3 – магнітопровід) складається з двох плат із запресованими в кожній з них шістьма постійними магнітами. Щоб отримати максимальний крутний момент, магніти в платах розміщують так, щоб їх протилежні полюси були

один проти одного. Між торцями магнітів розміщено струмопровідний диск 1.

Обертаючий момент, що діє на диск, пропорційний частоті обертання магнітів і визначається за наближеною формулою:

$$M_{об} = \frac{2,54B^2 d^3 r_0 \delta p}{\rho \sin \frac{\pi}{p}} \cdot 10^{-10} n,$$

де B – індукція в повітряному зазорі між магнітами, Гс; d – діаметр циліндричних магнітів, см; r_0 – відстань від осі обертання диска до центрів магніту, см; δ – товщина диска, см; p – число пар полюсів магніту (звичайно 6 або 4); ρ – питомий опір матеріалу диска, Ом·мм²/мм; n – швидкість обертання магнітів відносно диска, об/хв.

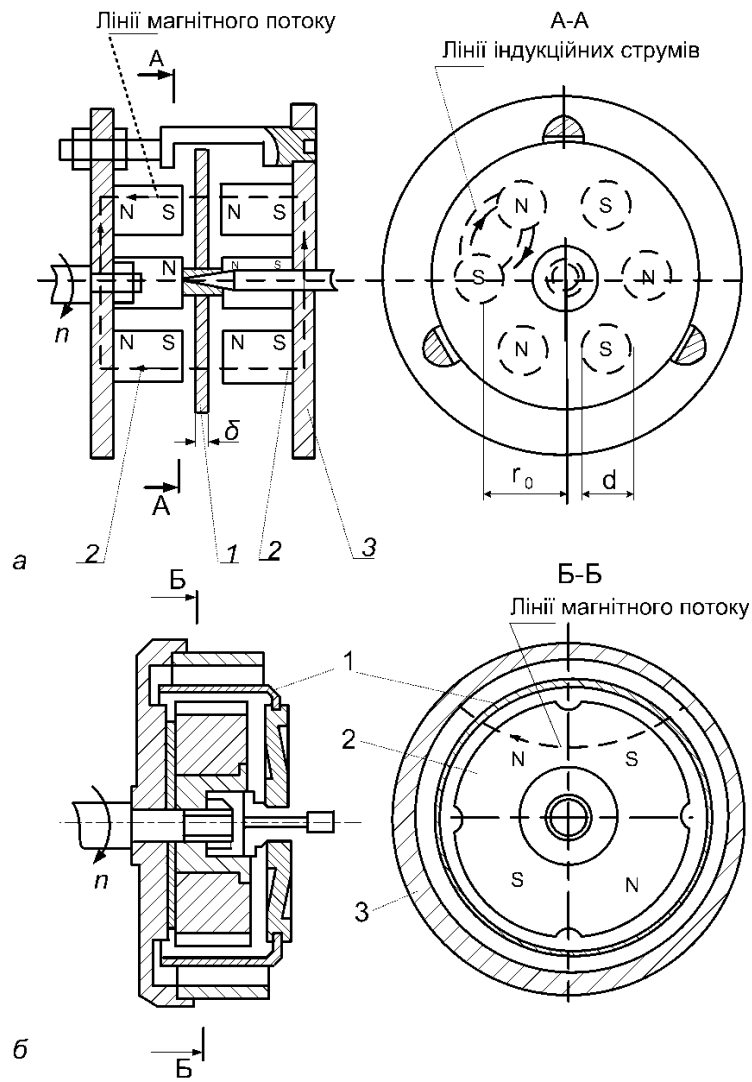


Рис. 10.22. Схеми індукційних перетворювачів:
 а — дискового типу; б — циліндричного типу

Індукційні перетворювачі, в яких змінний магнітний потік створюється нерухомими електромагнітами, дають змогу змі-

нювати і перетворювати параметри змінних струмів (струм, напругу, частоту, фазу, енергію тощо) в кутове переміщення рухомого елемента.

Приклад застосування індукційного перетворювача в гальванометрі показано на рис. 10.23. Змінні струми i_1 та i_2 , які підводяться до відповідних котушок, зсунуті за фазою один відносно одного на кут ψ . Якщо знехтувати втратами на гістерезис в осерді електромагніту, набраного з тонких ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі, та втратами на вихрові струми в осерді і рухомому елементі системи, то потоки Φ_1 та Φ_2 , що утворюються цими струмами, також будуть зсунуті за фазою на кут ψ . Ці потоки, як видно з рисунку, зсунуті один відносно другого. Для випадку системи з диском потоки Φ_1 і Φ_2 , накладаючись один на другий, створюють в металі диска між його ділянками I і II, розміщеними під полюсами, пульсуючий магнітний потік, максимум якого переміщується від ділянки I до ділянки II. При цьому вважають, що потік Φ_1 випереджає за фазою потік Φ_2 . Такий магнітний потік, що пульсує в диску, називають біжучим. Накладення потоків в індукційному перетворювачі (рис. 10.23, б) створює обертове магнітне поле.

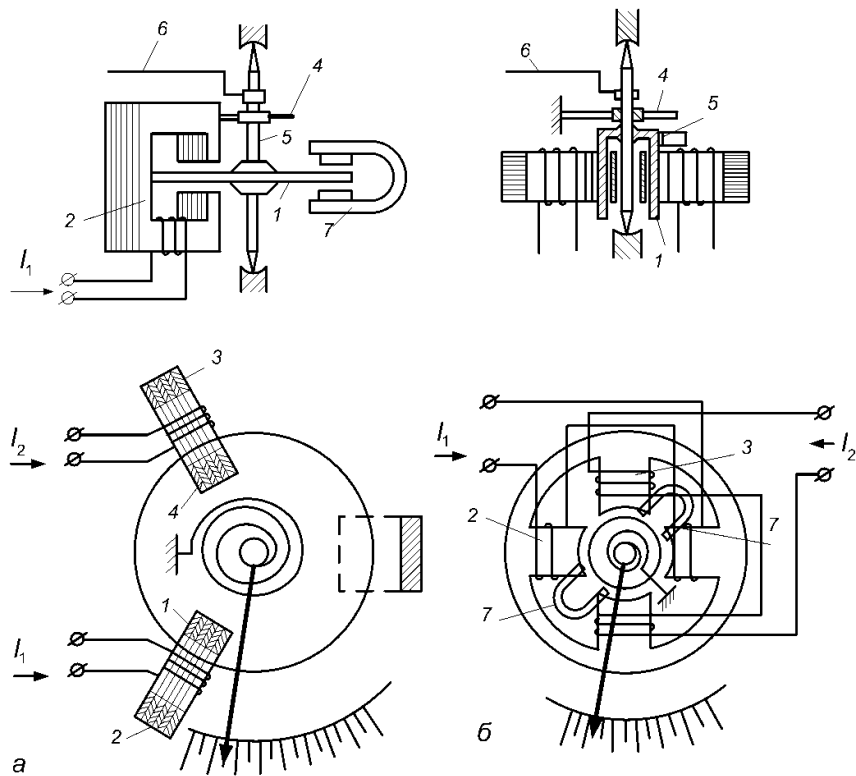


Рис. 10.23. Схеми індукційних гальванометрів:
а – з нерухомим диском; б – з рухомим циліндром

На рис. 10.23, б (де 1 – рухомий диск (циліндр); 2, 3 – електромагніти; 4 – пружинка, що створює протидіючий момент; 5 – вісь; 6 – стрілка; 7 – постійний магніт заспокоювача) зображено схему індукційного гальванометра з рухомим циліндром.

На рис. 10.24 зображено лінії струмів i'_1 , наведених в диску потоком Φ_1 , і частину диска, розміщену між полюсами електромагнітів. На рис. 10.24 введено такі позначення: 1 – сліди потоку Φ_1 ; 2 – сліди потоку Φ_2 ; 3 – частина диска. Кожен з потоків індукуює в диску ЕРС, яка відстає за фазою від потоку на чверть періоду. Ці ЕРС створюють відповідно струми i'_1 і i'_2 , які збігаються за фазою з відповідною ЕРС, якщо диск має лише активний опір.

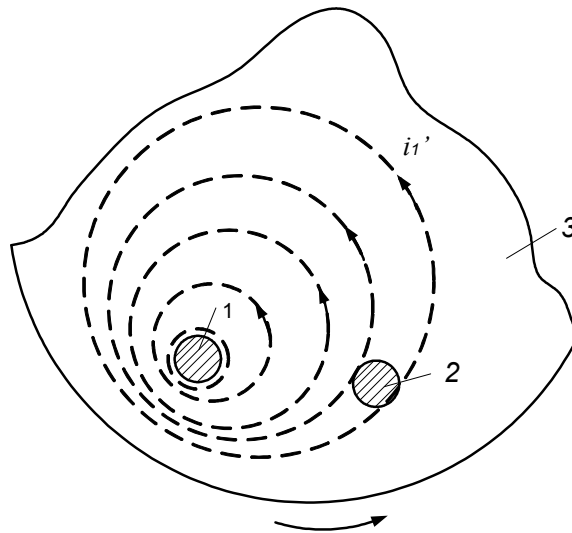


Рис. 10.24. Лінії струмів, наведених в диску потоком Φ_1

Струм i'_1 , потрапляючи в зону полюса II, взаємодіє з потоком Φ_2 і тим самим створює обертаючий момент для рухомої частини. Саме так поводить себе і струм i'_2 (індукований в диску потоком Φ_2 з потоком Φ_1). Момент з'являється лише в тому разі, коли між потоками Φ_1 і Φ_2 існує зсув фаз.

На рис. 10.25 показано векторну діаграму індукційного перетворювача. На діаграмі відкладено діючі значення струмів, потоків і ЕРС. Момент спричиняє поворот рухомої частини в напрямку від випереджуючого за фазою потоку до відстаючого. Через відносно великий момент інерції рухомої частини вона не встигає за зміною миттєвих значень обертаючих моментів. Відхилення рухомої частини визначається середнім значенням обертаючого моменту за період змінного струму. Результуючий момент, який діє на рухому частину, дорівнює:

$$M = kfI_1I_2 \sin \psi, \quad (10.17)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів системи; f – частота змінного струму; I_1, I_2 – діючі значення змінного струму; ψ – кут зсуву фаз між струмами I_1 і I_2 . Кут повороту рухомої частини

$$\alpha = \frac{k}{k_{np}} f I_1 I_2 \sin \psi, \quad (10.18)$$

де k_{np} – стала протидіючої пружини.

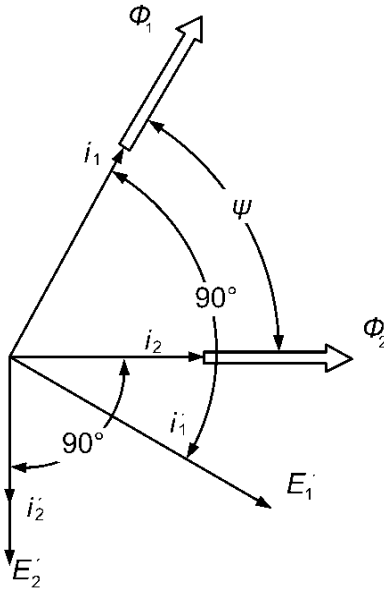


Рис. 10.25. Векторна діаграма індукційного перетворювача

Формула (10.18) показує, що обертаючий момент виникає лише за наявності мінімум двох струмів (і отже, двох потоків), які при цьому мають зсув за фазою $\psi = 90^\circ$. Індукційний перетворювач можна розрахувати і застосовувати лише для якоїсь однієї частоти змінного струму. Це пояснюється тим, що момент залежить і від частоти f . До конструктивного коефіцієнта k входить і питома провідність матеріалу диска, яка змінюється із зміною температури, що викликає зміну обертаючого моменту. З підвищенням температури навколишнього середовища, а також внаслідок нагрівання диска вихровими струмами обертаючий момент зменшується. Зміна температури приводить також до зміни опору обмоток електромагнітів.

Через втрати на гістерезис і вихрові струми індукційним перетворювачам даного типу притаманні великі похибки, що викликані змінами частоти змінного струму, а також змінами температури. Маючи

невисоку точність, індукційні перетворювачі як вимірювальні прилади майже не застосовуються. Переваги індукційних перетворювачів даного типу такі: великий обертаючий момент, малий вплив зовнішніх магнітних полів через наявність сильного магнітного поля самого перетворювача, стійкість до перевантаження та надійність в роботі.

10.5. Контрольні питання до розділу 10

1. Магнітоелектричні перетворювачі. Принцип дії. Переваги і недоліки. Схеми.
2. Електромагнітні перетворювачі, їх призначення. Схеми. Приклади використання. Переваги і недоліки.
3. Електродинамічні перетворювачі. Конструкції. Принцип дії. Переваги і недоліки.
4. Індукційні перетворювачі. Конструкції. Принцип дії. Застосування. Переваги і недоліки.

РОЗДІЛ 26. ПЕРЕЛІК ПРОГРАМНИХ ЗАПТАНЬ

1. Яка кількість основних схем включення потенціометричних перетворювачів?
 - 4.
2. Яка кількість основних елементів конструкції потенціометричного перетворювача?
 - 3.
3. Який опір потенціометричних перетворювачів підвищеної точності?
 - 100000 Ом.
4. Яка максимальна потужність розсіяння потенціометричних перетворювачів?
 - 15 Вт.
5. Який строк служби потенціометричних перетворювачів, застосовуваних в обчислювальних пристроях?
 - 500 тисяч циклів.
6. Який строк служби потенціометричних перетворювачів широкого використання?

- 50 тисяч циклів.
- 7. Яка точність потенціометричних перетворювачів широкого використання?
 - 5%.
- 8. Яка точність потенціометричних перетворювачів підвищеної точності?
 - 1%.
- 9. Яка точність високоточних потенціометричних перетворювачів?
 - 0,1%.
- 10. Який обертаючий момент потенціометричних перетворювачів широкого використання?
 - 35 мНм.
- 11. Який обертаючий момент багатообертових потенціометричних перетворювачів?
 - 50 мНм.
- 12. Яке промислове виробництво потенціометричних перетворювачів широкого використання?
 - 60%.
- 13. Яка максимальна кількість основних засобів побудови функціональних потенціометричних перетворювачів?
 - 5.
- 13. Яка кількість основних різновидів тензометричних перетворювачів?
 - 4.
- 14. Яка кількість основних різновидів тензометричних перетворювачів по способу розміщення на об'єкті вимірювання?
 - 2.
- 15. Який опір дротяних тензоперетворювачів?
 - 500 Ом.
- 16. Який опір фольгових тензоперетворювачів?
 - 50 Ом.
- 17. Який відносний коефіцієнт відносної тензочутливості у дротяного тензоперетворювача?

- 1.
- 18. Який відносний коефіцієнт відносної тензочутливості у напівпровідникового тензоперетворювача?
 - 100.
- 19. Яке відношення розміру бази до ширини тензоперетворювача?
 - 2-5
- 20. Яка кількість основних схем ввімкнення ємнісних перетворювачів?
 - 2.
- 21. Яка кількість основних конструктивних різновидів ємнісних перетворювачів?
 - 3.
- 22. Яка кількість основних конструктивних різновидів потенціометричних перетворювачів по способу переміщення движка?
 - 5.
- 23. Яка кількість основних конструктивних різновидів трансформаторних перетворювачів?
 - 3.
- 24. Скільки є основних різновидів п'єзоефекту, на яких побудовано дію п'єзоперетворювачів?
 - 2.
- 25. Скільки відомо основних різновидів п'єзоефекту, залежних від дії сили, напрямленої вздовж електричної осі і – вздовж механічної осі п'єзоперетворювача?
 - 2.
- 26. Скільки відомо головних осей кристалу кварца п'єзоперетворювача?
 - 3.
- 27. Яка кількість основних схем включення механотронних перетворювачів?
 - 1.

28. Скільки відомо основних різновидів режимів роботи електричної машини?
- 2.
29. Скільки відомо основних різновидів режимів роботи обертового трансформатора?
- 2.
30. Скільки відомо основних різновидів режимів роботи електричної машини?
- 2.
31. Скільки відомо основних різновидів схем симетрування обертового трансформатора?
- 3.
32. Скільки відомо основних різновидів режимів роботи сельсину?
- 2.
33. Скільки відомо основних типів синхронних мікромашин?
- 5.
34. Яка кількість основних елементів реактивного двигуна?
- 3.
35. Скільки відомо режимів роботи гістерезисного двигуна (по його механічній характеристиці)?
- 2.
36. Скільки відомо основних схем підімкнення обмоток збудження машин постійного струму?
- 3.
37. Скільки є основних способів керування виконавчими двигунами залежно від того, в яку з обмоток подається сигнал керування?
- 2.
38. Скільки є основних режимів роботи сельсина?
- 2.
39. Скільки є основних режимів роботи обертового трансформатора?

- 2.
- 40. Скільки є основних типів двофазного асинхронного двигуна?
- 3.
- 41. Скільки є основних типів схем оптичних перетворювачів?
- 3.
- 42. Скільки є основних типів схем ємнісних перетворювачів?
- 2.
- 43. Скільки є основних типів схем трансформаторних перетворювачів?
- 3.
- 44. Скільки є основних типів схем перетворювачів контактного опору?
- 1.
- 45. Що використовується в контактних перетворювачах для іскрогасіння?
- R-C коло.
- 46. Які матеріали використовуються в контактних перетворювачах в якості анода?
- золото, срібло, платина, мідь.
- 47. Які матеріали використовуються в контактних перетворювачах в якості катода?
- вольфрам, іридій, молібден.
- 48. Скільки є основних типів герметизованих контактів?
- 2.
- 49. Скільки параметрів зумовлюють ємність ємнісного перетворювача?
- 3.
- 50. У якого типу тензоперетворювача найбільший відносний коефіцієнт відносної тензочутливості?
- у напівпровідникового тензоперетворювача.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д.И., Костина Е.И., Кузнецова Н.И. Датчики контроля и регулирования. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
2. Асс Б.А., Жукова Н.М., Антипов Е.Ф. Детали и узлы авиационных приборов и их расчет. – М.: Машиностроение, 1966. – 415 с.
3. Бабаева Н.Ф. и др. Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств. – Л.: Машиностроение, 1967. – 477 с.
4. Базжин Ю.М., Цивин А.А., Моторыгина Т.А. Мостовые монокристаллические полупроводниковые тензорезисторные структуры. Приборы и методы измерения механических величин. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения. Серия ТС. Вып. 1, 1974. – 35 с.
5. Бахмутский В.Ф., Гореликов Н.И., Кузин Ю.Н. Оптоэлектроника в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1979. – 280 с.
6. Белевцев А.Т. Потенциометры. – М.: Машиностроение, 1969. – 328 с.
7. Берг А., Дин П. Светодиоды. – М.: Мир, 1973. – 108 с.
8. Берлин Г.С. Электронные приборы с механически управляемыми электродами. – М.: Энергия, 1971. – 160 с.
9. Берлин Г.С., Коклюшев Б.П. Высокочувствительные механотронные акселерометры //Измерит, техника. – 1973. – № 5. – С. 39 – 42.
10. Берлин Г.С., Розентул С.А. Механотронные преобразователи и их применение. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1966. – 992 с.
12. Виноградов Ю.Д., Машистов В.М., Розентул С.А. Электронные измерительные системы для контроля малых перемещений. – М.: Машиностроение, 1976. – 142 с.
13. Высоцкий А.В., Горенштейн Б.Я., Розентул С.А. Комплекс электронных средств для измерения линейных размеров в машиностроении // Измерит, техника. – 1976.–№ 11. – С. 16 – 18.
14. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. – М.: Высшая школа, 1978. – 328 с.

15. Волосов С.С., Педь Е.С. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1975. – 335 с.
16. Гаврилов А.Н., ред. Приборостроение и средства автоматики. Справочник. Т. 2, кн. 1. – М.: Машиностроение, 1964. – 569 с.
17. Гаврилов А.Н., ред. Приборостроение и средства автоматики. Справочник. Т. 2, кн. 2. – М.: Машиностроение, 1964. – 369 с.
18. Гальперин М.С. Самолет АН-24. Техническое описание. Книга VI. – М.: Машиностроение, 1970. – 200 с.
19. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.
20. Гитис Э.И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 195 с.
21. Гончарский С.А. Механически управляемые электронные лампы. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 142 с.
22. Горенштейн И.А., Шульман И.А., Сафарян А.С. Инерциальная навигация. – М.: Сов. радио, 1962. – 248 с.
23. Денисов А.А., Нагорный В.С. Пневматические и гидравлические устройства автоматики. – М.: Высш. шк., 1978. – 214 с.
24. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектрические элементы в приборостроении и автоматике. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
25. Дорофеев А.Л. и др. Индукционная толщинометрия. – М.: Энергия, 1978. – 189 с.
26. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергоиздат, 1983. – 616 с.
27. Зарипов М.Ф. Датчики малых угловых скоростей. – Уфа: Изд-во Уфим. авиац. института. – 1975. – 68 с.
28. Зарипов М.Ф., Петрова И.Ю. Проблемы развития информационной вычислительной техники. – Уфа, 1979. – 52 с. (Препринт. Башк. филиал АН СССР).
29. Заседателев С.М., Беликов Л.В. и др. О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями // Приборы и системы управления. – 1971. – №11. – С. 45 – 48.

30. Захарин М.И., Безвесильная Е.Н. Преобразующие устройства приборов. Учеб. пособие. – К.: КПИ, 1980. – 20 с.
31. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 735 с.
32. Изиятов В.А., Корицкий А.В., Мордвинов В.А. Электрические микромашины переменного тока интегрального управления. – М.: Энергия, 1976. – 107 с.
33. Елисеев В.А., Шинянский А.В., ред. Справочник по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
34. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 600 с.
35. Курочкин А.П. Состояние и перспектива развития средств измерений линейных и угловых размеров в отрасли // Измерит. техника. – 1976. – № 2. – С. 19 – 21.
36. Майоров С.В. Фотоэлектронные и термоэлектронные приборы и их применение. – М.: Машиностроение, 1973. – 160 с.
37. Малов В.В. Пьезоэлектрические датчики / Измерение, контроль, автоматизация. – 1975. – № 1 (3). – С. 14 – 27.
38. Мартюшов К.И., Тихонов А.И., Зайцев Ю.В. Прецизионные проволочные резисторы. – М.: Энергия, 1979. – 192 с.
39. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263-70. – М.: 1970. – 16 с.
40. Миллман Я. Импульсные и цифровые устройства. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 255 с.
41. Минаев И.Г., Трофимов А.И. Устройство для измерения механических давлений. А. с. № 315936. Кл. G01P1. – Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1971, № 29.
42. Мироненко А.В. Фотоэлектрические измерительные системы. – М.: Энергия, 1967. – 160 с.
43. Новицкий П.В., ред. Электрические измерения неэлектрических величин. – Л.: Энергия, 1975. – 575 с.
44. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника, физические основы, приборы и устройства. – М.: Машиностроение, 1978. – 48с.

45. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
46. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971. – 544 с.
47. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических опико-электронных приборов. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
48. Пельпор Д.М., ред. Гирскопические системы. Часть 3. – М.: Высш. шк., 1972. – 470 с.
49. Пиотровский Л.М. Электрические машины. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 504 с.
50. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. – К.:Выща шк., 1982. – 477 с.
51. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. –К.: Выща шк., 1981. – 296 с.
52. Полищук Е.С., Саламаха В.А. и др. О повышении точности и стабильности платиновых термометров сопротивления. В кн. Новые исследования в термометрии. – Львов: Вищ. шк., 1974, – С. 41 – 45.
53. Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. – М.: Высш. школа, 1982. – 264 с..
54. Пульер Д.С., ред. Гирскопические системы приборов. – М.: Высш. шк., 1972. – 471 с.
55. Преснухин Л.Н., ред. Фотоэлектрические преобразователи информации. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
56. Раковский М.Е., ред. Приборостроение и средства автоматизации: Справочник. Том 4. – М.: Машиностроение, 1965. – 694 с.
57. Ренский А.Б., Баранов Д.С., Макаров Р.А. Тензометрирование строительных конструкций и материалов. – М.: Стройиздат, 1977. – 239 с.
58. Свечников С.В. Элементы оптоэлектроники. – М.; Сов. радио, 1971. – 272 с.
59. Срибнер Л.А. Точность индуктивных преобразователей перемещений. – М.: Машиностроение, 1975. – 104 с.

60. Ступель Ф.А. Индуктивные и индукционные преобразователи механических величин. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. – 102 с.
61. Таланчук П.М. Машинный синтез систем коррекции измерительных преобразователей. – К.: Выща шк., 1985. – 68 с.
62. Техническая кибернетика. Кн. 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы. – М.: Машиностроение, 1976. – 736 с.
63. Тищенко О.Ф., Киселев Л.Т., Коваленко А.Н. и др. Элементы приборных устройств. Т.1. – М.: Высш. шк., 1982. – 304 с.
64. Тищенко О.Ф., Киселев Л.Т., Коваленко А.Н. и др. Элементы приборных устройств. Т. 2. – М.: Высш. шк., 1982. – 263 с.
65. Трофимов А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок. – М.: Машиностроение, 1979. – 94 с.
66. Трофимов А.И., Минаев И.Г. Повышение стабильности пьезоэлектрических устройств для измерения статических давлений и усилий // Изв. вузов. Приборостроение. – 1972. – № 11. – С. 17 – 19.
67. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин, – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
68. Федотов А.В. Расчет и проектирование индуктивных измерительных устройств. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
69. Фельдбаум А.А. Вычислительные устройства в автоматических системах. – М.: Физматгиз, 1959. – 170 с.
70. Харкевич А.А. Теория преобразователей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 188 с.
71. Харкевич А.А. Избранные труды. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
72. Хомерики О.К. Гальваномангнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. – М.: Энергия, 1975. – 176 с.
73. Хрущев В.И. Электрические машины. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.
74. Четвертков Н.И., Коросько Н.М. Потенциометры. – М.: Сов. радио, 1978. – 64 с.

75. Чумаков Н.М., ред. Расчет исполнительных корректирующих преобразовательных элементов автоматических систем. – К.: Техника, 1971. – 352 с.
76. Чумаков Н.М., ред. Расчет измерительных и усилительных элементов автоматических систем. – К.: Техника, 1977. – 356 с.
77. Beckers I.H. Elektrisches Messen mechanischer Broben // "VDI – Z" 118. – n17, 18. – 1976. – P. 863 – 872.
78. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
79. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1983. – 295 с.
80. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
81. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 488 с.
82. Ерганжиев Н.А. Цветное телевидение в измерительной технике. – М.: Связь, 1980. – 104 с.
83. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
84. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 792 с.
85. Цифровое кодирование телевизионных изображений / И.И. Цуккерман, Б.М. Кац, Д.С. Лебедев и др.; Под ред. И.И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
86. Чернега В.С. Сжатие информации в компьютерных сетях: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.К. Маригодова. – Севастополь: СевГТУ, 1997. – 214 с.
87. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
88. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

89. Городов А.Н. Измерение температур газовых потоков. – М. – Л.: Машгиз, 1962. – 136 с.
90. Леневерг Ф. Измерение температур в технике. - М.: Metallurgia, 1980. – 253 с.
91. Майоров С.В. Фотоэлектронные термоэлектронные приборы и их применение. – М.: Машиностроение, 1973. – 160 с.
92. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. – М.–Л., Госэнергоиздат, 1960. – 87 с.
93. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики. - М.–Л.: Энергия, 1965. – 239 с.
94. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.
95. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень: Підручник. – К.: Либідь, 2001. – 350 с.
96. Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 264 с.
97. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2006. – 560 с.
98. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Інформаційно-комп'ютерні системи та технології. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин.: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 320 с.
99. Безвесільна О.М., Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри.: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.
100. Безвесільна О.М., Киричук Ю.В. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем.: Навчальний посібник. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 172 с.
101. Безвесільна О.М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем. Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 700 с.