

Міністерство освіти та науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

М.О. Голофєєва
О.С. Левинський

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
з дисципліни

«ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ»

для здобувачів спеціальності 175

Одеса 2024

Міністерство освіти та науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

М.О. Голофєєва
О.С. Левинський

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
з дисципліни

«ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ»

для здобувачів спеціальності 175

Одеса 2024

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Вимірювальні перетворювачі» для здобувачів спеціальності 175 / Укл.: М.О. Голофєєва, О.С. Левинський – Одеса: «Одеська політехніка», 2024. – 68 с.

Укладачі: М.О. Голофєєва, доц.
О.С. Левинський, ст.. викл.

Методичні вказівки містять сучасну інформацію стосовно вимірювальних перетворювачів і сенсорів різних видів, які використовуються для побудови інформаційно-вимірювальних систем різноманітного призначення. Основна увага приділена принципам побудови вимірювальних перетворювачів і сенсорів та їх використанню для вимірювання різних фізичних величин. Викладені фізичні основи функціонування сенсорів та первинних перетворювачів неелектричних величини, питання побудови перетворювачів електричних та магнітних величин. Для кожної практичної роботи підібраний перелік задач. Для здобувачів спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології». Може бути використано аспірантами та інженерами.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
<i>Практична заняття 1-2</i> ОСНОВНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	6
<i>Практична заняття 3-6</i> ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	12
<i>Практична заняття 7-8</i> ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН	3
<i>Практична заняття 9-15</i> ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН. 3	

ВСТУП

Вимірювання не є самоцілью, а мають певну область використання, тобто проводяться для досягнення деякого кінцевого результату відповідно до поставлених завдань. Залежно від призначення вимірювань (для контролю параметрів продукції, для випробувань зразків продукції з метою встановлення її технічного рівня, для діагностики технічного стану машин і фізіологічного рівня біологічних об'єктів, для наукових досліджень, для обліку матеріальних та енергетичних ресурсів та ін.) кінцевий результат в тому, чи іншому вигляді відображає необхідну інформацію про кількісні властивості об'єктів, явищ і процесів (в тому числі, технологічних). Причому така інформація може бути отримана шляхом вимірювання, в процесі випробування або контролю. Основним об'єктом вимірювання є фізичні величини - властивості фізичного об'єкта (фізичної системи, явища або процесу), загальні в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальні для кожного з них.

Методичні вказівки містять сучасну інформацію стосовно вимірювальних перетворювачів і сенсорів різних видів, які використовуються для побудови інформаційно-вимірювальних систем різноманітного призначення. Основна увага приділена принципам побудови вимірювальних перетворювачів і сенсорів та їх використанню для вимірювання різних фізичних величин.

Викладені фізичні основи функціонування сенсорів та первинних перетворювачів неелектричних величини, питання побудови перетворювачів електричних та магнітних величин. Підібрані задачі для кожної практичної роботи.

ОСНОВНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Питання, що розглядаються

На заняття практично засвоюється методики розрахунків максимальної допустимої похибки вимірювань.

Теоретичні відомості

Вимірювальний перетворювач – це технічний засіб, який служить для перетворення вимірювальної величини в іншу величину чи сигнал вимірювальної інформації, придатний для обробки, зберігання, подальшого перетворення, індикації чи передачі. Перетворювачу притаманні нормовані метрологічні характеристики. Самостійного значення як засіб вимірювання вимірювальний перетворювач не має. Перетворювач, як правило, входить в склад якого-небудь вимірювального приладу чи застосовується разом з яким-небудь засобом вимірювання. За місцем розміщення у вимірювальному колі перетворювачі підрозділяються на первинні і проміжні, а за характером перетворення – на аналогово-цифрові та цифроаналогові.

Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) або сенсор являє собою вимірювальний перетворювач, на який безпосередньо діє вимірювальна фізична величина. ПВП займає перше місце у вимірювальному колі вимірювального приладу чи системи. Прикладами сенсорів можуть слугувати терморезистори, термопари, які використовуються для визначення температури середовища чи об'єкта.

Проміжний вимірювальний перетворювач займає місце у вимірювальному колі після первинного перетворювача.

Датчик(сенсор)– термін досить часто вживається в технічній літературі. Це – окремий первинний вимірювальний перетворювач, від якого надходять сигнали вимірювальної інформації. Конструкція датчика дозволяє монтувати його безпосередньо на об'єкті вимірювання, до того ж на значній відстані від засобу вимірювання, будучи відокремленим від нього.

Вимірювальним колом називають сукупність елементів вимірювального приладу, які створюють неперервний шлях проходження вимірювального сигналу однієї фізичної величини від входу до виходу. Вимірювальне коло вимірювальної системи називають вимірювальним каналом, число яких може бути різним.

Вимірювальний пристрій являє собою частину вимірювального приладу (чи системи), яка виконана у вигляді окремої конструкції із властивим їй спеціальним призначенням.

Індикатор (від лат. indicator – показчик) – технічний засіб (речовина), який застосовується для встановлення наявності якої-небудь ФВ або її порогового значення. Індикатор відображає змінення будь-якого параметра контрольованого технологічного процесу чи об'єкта у формі, зручній для безпосереднього сприйняття оператором. Використовуються індикатори візуальні, акустичні та ін.

Чутливий елемент (ЧЕ) засобу вимірювання – це частина першого у вимірювальному каналі вимірювального перетворювача, сприймаючого вхідний вимірювальний сигнал.

Вимірювальний механізм засобу вимірювання являє собою частину елементів засобу вимірювання, які спричиняють необхідне переміщення показчика (стрілки, світлової плями і т.д.).

До основних характеристик вимірювальних перетворювачів відносять:

- функцію (рівняння) перетворення,
- основну та додаткову похибки,
- адитивну та мультиплікативну похибки.

Функція перетворення (ФП) являє залежність між вихідною та вхідною величинами, тобто

$$y = f(x) \quad (1.1)$$

ФП може бути:

- нелінійною (рис. 1.1, а) і описуватись рівнянням загального виду (1.1);
- лінійною і представлятись виразом

$$y = kx, \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт перетворення (відношення вихідної величини ЗВТ до вхідної). Функція графічно зображується у вигляді прямої, яка проходить через початок координат (рис. 1.1, б);

- лінійною, яка описується виразом

$$y = y_0 + kx, \quad (1.3)$$

де y_0 – значення функції при нульовому значенні вхідної величини ($x = 0$). Графічне зображення такої функції – пряма зміщена відносно початку координат на величину y_0 (рис. 1.1, в).

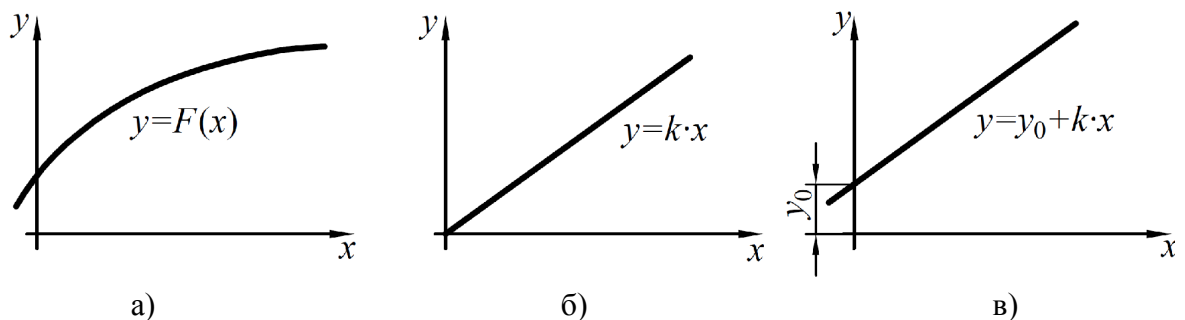


Рисунок 1.1 – Можливі типи функції перетворення ЗВТ

Крім аналітичного та графічного описання ФП може бути задана у вигляді таблиці. Так, наприклад, функція перетворення термоперетворювачів задається переважно у табличному вигляді. В цьому випадку функція отримала ще назву *номінальної статичної характеристики перетворення* (НСХП). Звичайно прагнуть того, щоб ФП була лінійною. Однак для більшості первинних перетворювачів неелектричних величин функція перетворення істотно нелінійна. Тому при підмиканні таких перетворювачів до вимірювальних приладів, що мають лінійну залежність показів від вхідної величини, виникає задача лінеаризації функції перетворення сенсора.

ФП звичайно містить параметри перетворювачів, тому вона використовується при розрахунку і конструюванні їх.

Метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів – це характеристики, які впливають на результат та точність вимірювання та призначені для оцінювання технічного рівня та якості вимірювальних перетворювачів, а також інструментальної складової характеристик точності перетворення.

Для вимірювальних перетворювачів встановлені такі групи метрологічних характеристик:

1. Характеристики, призначені для визначення результатів вимірювання (без введення поправок):

- Функція перетворення вимірювальних перетворювачів;
- Вид вихідного коду, кількість його розрядів, номінальна ціна одиниці найменшого розряду коду засобів вимірювальної техніки, призначених для подання інформації в цифровому коді.

Розрізняють номінальну функцію перетворення вимірювального перетворювача $y_i = f_i(x)$, яку він повинен мати відповідно до стандартів або технічних умов на ЗВТ, і реальну $y = f(x)$, яку він має в дійсності. Номінальну функцію можна записати у такому вигляді:

$$y_i = S_i x + y_{oi} , \quad (1.4)$$

де S_i – номінальна чутливість перетворювача; y_{oi} – значення вихідної величини при нульовому значенні вхідної ($x = 0$).

Відхилення такої функції перетворення від номінальної може бути викликано відхиленням від номінальних значень як y_{oi} , так і S_i .

Відзначимо, що на вимірювальний перетворювач крім вимірювальної величини впливають інші небажані чинники, які стають джерелами похибок. Їхня дія накладається на вимірювальний сигнал і, відповідно, на показання перетворювача. Внаслідок цього виникають похибки вимірювання, які в залежності від характеру впливу на них вимірювальної ФВ називають *адитивними* чи *мультиплікативними*. Адитивні похибки не залежать від значення вимірювальної величини. Обумовлені ці похибки неномінальними значеннями вихідної величини при нульовому значенні вхідної. Графік функції в цьому випадку переміщується паралельно самому собі на величину Δy_a (рис. 1.2, а). Значення абсолютної адитивної похибки

$$\Delta y_a = y_o - y_{oi} , \quad (1.5)$$

де y_{oi} – номінальне значення y_o .

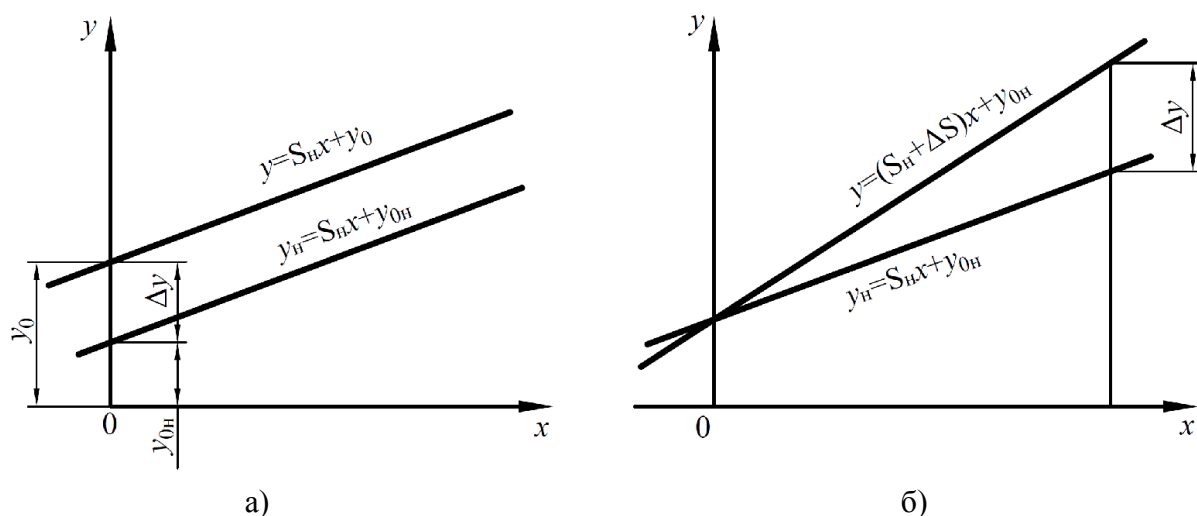


Рисунок 1.2 – Графічне представлення адитивної та мультиплікативної похибок

Мультиплікативна похибка залежить не тільки від розміру ФВ, але і від швидкості зміни її з часом. Похибка обумовлена неномінальним значенням чутливості перетворювача. Графіки номінальної і неномінальної функції перетворення у цьому випадку будуть відрізнятися кутом нахилу прямих, оскільки чутливість визначає величину цього кута (рис. 1.13, б).

Припустимо, що чутливість перетворювача змінилась на величину ΔS і стала $S_i + \Delta S$. Тоді абсолютна похибка перетворювача

$$\Delta y_i = y - y_i = [(S_i + \Delta S)x + y_{oi}] - (S_i x + y_{oi}) = \Delta S x, \quad (1.6)$$

тобто величина абсолютної мультиплікативної похибки пропорційна вхідній вимірювальній величині.

2. Характеристики похибок засобів вимірювальної техніки

Похибки вимірювань можуть бути класифіковані за такими ознаками:

- способом вираження – абсолютні, відносні;
- способом обробки ряду вимірювань – середньоарифметичні, середньоквадратичні;
- умовами вимірювання фізичної величини – статичні, динамічні;
- повнотою охоплення вимірювальної задачі – часткові, повні;
- стосовно до одиниці фізичної величини – відтворення одиниці, передача розміру одиниці;
- за характером проявлення – систематичні, випадкові.

Якість процесу вимірювання ФВ кількісно оцінюють величиною похибки результату вимірювання. Чим менше похибка, тим точніше вимірювання, тим досконаліше процес вимірювання. У відповідності з визначенням *похибка результату вимірювання* – це відхилення результату вимірювання x від істинного (справжнього) значення X вимірювальної величини і знаходиться за формулою:

$$\Delta = x - X. \quad (1.7)$$

Наведена формула характеризує абсолютну похибку ФВ, одиницею якої є одиниця вимірювальної величини. Однак абсолютна похибка не зовсім зручна, коли постає задача порівняння якості вимірювань різних значень однієї величини. В цьому випадку більш доцільно застосовувати *відносну похибку* – відношення абсолютної похибки до істинного значення вимірювальної величини, тобто

$$\delta = \frac{\Delta}{X}. \quad (1.8)$$

Відносна похибка зазвичай виражається у відсотках.

Необхідно відмітити досить важливу особливість, яка пов'язана з істинним значенням ФВ. Істинне значення за природою недоступне для пізнання. Оскільки істинне значення ФВ невідомо, то його приходить заміняти дійсним значенням. Дійсне значення фізичної величини – це знайдене експериментальним шляхом значення і настільки близьке до істинного, що для поставленої вимірювальної задачі може його замінити. Дійсне значення ФВ – це значення конкретної величини, іноді прийняте за взаємною згодою, якому властива невизначеність. За дійсне значення ФВ зазвичай приймають середнє арифметичне із низки значень величини, одержаних при рівноточних вимірюваннях, або арифметичне середнє зважене при нерівноточних вимірюваннях. При повірці або калібруванні засобів

вимірювальної техніки (ЗВТ) за дійсне значення приймають значення зразкової міри, або покази зразкового засобу вимірювання.

Однією із різновидностей відносної похибки можна вважати зведену похибку (γ). Для аналогових вимірювальних приладів зведена похибка визначається як відношення найбільшої абсолютної похибки Δx_{max} для всієї низки показів до нормованого значення N . Що стосується нормованого значення, то це – верхня межа вимірювань або діапазон вимірювання, тобто:

$$\gamma = \frac{\Delta x_{max}}{N} \cdot 100 \quad (1.9)$$

Статична похибка вимірювання – це похибка результату вимірювання, яка властива статичним (стаціонарним) умовам вимірювання. При цих умовах розмір ФВ з часом не змінюється, тривалість її вимірювання не обмежується, метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки залишаються постійними, зокрема закінчуються перехідні процеси у ЗВТ при поданні на їх вхід вимірювальної величини. Величина таких похибок залежить тільки від розміру фізичної величини.

Однак на практиці перераховані умови часто порушуються. При цьому виникає так звана *динамічна похибка вимірювань*. Величина такої похибки залежить не тільки від розміру ФВ, але і від закономірності її зміни в процесі вимірювання. Найбільшого значення динамічні похибки сягають при різкій, стрибкоподібній зміні вимірювальної ФВ. Так, наприклад, при миттєвому збільшенні температури тіла, контрольованої рідинним скляним термометром, термометрична рідина не відразу приходить у теплову рівновагу з тілом. Рідина нагрівається до нової температури поступово внаслідок теплової інерції процесу теплообміну. Показання термометра будуть змінюватись зі зміною температури тіла, але з деяким запізненням. Термометр буде фіксувати температуру дещо нижчу від справжньої температури тіла. Це і являє собою динамічну похибку.

Систематична похибка вимірювання – це складова похибка результату вимірювання, яка залишається постійною чи закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж фізичної величини.

Систематичні похибки підрозділяють залежно від:

- характеру зміни – на постійні, прогресивні і похибки, що змінюються за складним законом (періодичні);
- причин появи – на інструментальні, похибки прийнятого методу вимірювання, суб'єктивні та похибки внаслідок відхилення умов вимірювання від встановлених.

Постійні похибки – похибки, що тривалий час зберігають своє значення, наприклад, протягом часу виконання всієї низки вимірювання ФВ. Ці похибки зустрічаються найбільш часто.

Прогресивні похибки – безперервно зростаючі або спадні похибки. До них можна віднести, наприклад, похибки, обумовлені зношуванням вимірювальних наконечників ЗВТ. Це явище має місце в приладах активного контролю діаметра деталей при їх шліфуванні.

Періодичні похибки – похибки, значення яких є періодичною функцією часу чи функцією переміщення показчика вимірювального приладу.

Похибки, що змінюються за складним законом, виникають внаслідок спільної дії декількох систематичних похибок.

Систематичні похибки не можна виключити із результату повторним вимірюванням ФВ. Ці похибки відрізняються своєю відтворюваністю. Їх абсолютна величина та знак залишаються незмінними при заданих умовах. Разом з цим систематичні похибки в принципі можуть бути виявлені та усунені. Систематичні похибки можна вилучити із результату

вимірювання шляхом введення поправок, які за величиною дорівнюють похибці, але з протилежним їй знаком.

Випадкова похибка вимірювання – це складова результату вимірювання, що змінюється непередбачуваним чином (за значенням та знаком) у серії повторних вимірювань, проведених з однаковою ретельністю одного й того ж розміру фізичної величини. Випадкова похибка виникає, наприклад, при вимірюванні діаметра стрижня в одній і тій же площині перетину. Застосовуючи при цьому один і той же прилад, при тих самих умовах, і при цьому експериментатор буде одержувати кожний раз різний результат. Щоправда, результати спостережень будуть мало відрізнятися один від одного, не збігаючись тільки в останніх значущих цифрах.

У появі випадкових похибок не спостерігається якої-небудь закономірності. Вони виникають в результаті дії окремих впливових факторів. Заздалегідь не відомі ні абсолютна величина, ні знак випадкової похибки. Випадкові похибки неминучі, їх неможливо усунути і вони завжди присутні в результаті вимірювання. Ці похибки спричиняють розсіювання результатів при багаторазовому і досить точному вимірюванні однієї і тієї ж фізичної величини при незмінних умовах.

Не дивлячись на те, що коливання кожної окремої випадкової похибки здаються на перший погляд неначе хаотичними, проте в статистичному розумінні ці похибки, в своїй сукупності, підлягають певним законам. Так, якщо на вісь абсцис нанести значення випадкових похибок, а на вісь ординат – відносну кількість даних значень, яка являє собою відношення кількості похибок даного значення до їх загальної кількості, то при нескінченному числі вимірювань ($n \rightarrow \infty$) дістанемо графік певного закону розподілу випадкових похибок.

3. Характеристики чутливості до впливних факторів

Ці характеристики нормують, встановлюючи номінальну функцію впливу як залежність зміни метрологічних характеристик ЗВТ від зміни впливних величин чи неінформативних параметрів вхідного сигналу, а також визначають межі допустимих змін метрологічних характеристик (зокрема характеристики похибок) у разі змін впливних факторів у заданих межах. Границі допустимих змін певної додаткової похибки ЗВТ частіше за все називають межами цієї допустимої похибки.

Похибка виникає, наприклад, у випадку неврахованої чи недостатньо врахованої дії тієї чи іншої впливної величини (температури, атмосферного тиску, вологості повітря, напруженості магнітного поля, вібрації та ін.), неправильної установки ЗВТ, порушення правил їхнього взаємного розташування і т.д.. Необхідно зазначити, що у техніці вимірювань в якості параметрів, що характеризують нормальні умови проведення вимірювань, прийняті:

- температура навколишнього середовища ($+20 \pm 2$)°C;
- відносна вологість повітря (65 ± 15) %;
- частота струму живильної мережі (50 ± 1) Гц;
- відхилення положення приладу від горизонтального $+2^\circ$;
- практична відсутність електричних і магнітних полів.

4. Динамічні характеристики.

Нормовані динамічні характеристики засобів вимірювальної техніки поділяють на повні та часткові. До повних відносять диференційне рівняння, перехідну, імпульсну перехідну та передавальні функції, а також сукупність амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик. До часткових відносять окремі параметри повних характеристик та характеристики, що не відображають повністю динамічні властивості засобу вимірювальної техніки, наприклад, час встановлення показань на індикаторі вимірювального пристрою.

5. Характеристики засобів вимірювальної техніки, що відображають їхню здатність впливати на інструментальну складову похибок вимірювань внаслідок взаємодії з будь-яким

компонентом, під'єднаним до виходу або входу (об'єктом вимірювань, ЗВТ, тощо). Прикладами таких характеристик є вхідний та вихідний імпеданси лінійного вимірювального перетворювачі.

6. Неінформативні параметри вихідного сигналу засобу вимірювальної техніки.

Практичні завдання

1. Визначити сталу шкали та показання вольтметра з межею вимірювання 3 В та максимальним відліком 150, якщо його вказівник стоїть на позначці шкали 120.
2. Встановити границю вимірювання та сталу шкали амперметра з максимальним відліком 100, якщо при відхиленні вказівника а значення шкали 80 отримали показання 40 мА.
3. Визначити інтервал, в якому можуть знаходитися дійсне значення опору міри електричного опору класом точності 0,02 з номінальним значенням опору 10 Ом.
4. Визначити границі основної абсолютної та відносної похибок показання 5 кОм аналогового омметра класом точності 2,5 з довжиною шкали 68 мм. Чутливість в даній точці шкали 25 мм/кОм.
5. Аналоговий амперметр з межею вимірювання 75 А та максимальним відхиленням шкали 150 має граничне значення допустимої абсолютної похибки $\pm 0,015$ А. визначити клас точності приладу та граничні значення відносної похибки, якщо при вимірюванні сили струму отримали відлік 100.
6. Визначити інтервал, в якому може знаходитися дійсне значення опору однозначної міри електричного опору класом точності 0,01 з номінальним значенням опору 10^{-3} Ом.
7. При вимірювання частоти сигналу частотоміром класу точності 1 в діапазоні 250...400 Гц отримали показання 350 Гц. Записати результат вимірювання, якщо експеримент проводили за нормальних умов.
8. Прилад для вимірювання швидких лінійних переміщень складається із датчика, вимірювального неврівноваженого мосту, підсилювача та вібратора магнітоелектричного осцилографу. На датчик впливає вимірюване переміщення 1 мм. При цьому він змінює свій опір на 1 %. Це викликає виникнення напруги на виході мосту 10 мВ. Чутливість підсилювача складає 10 мА/мВ. Чутливість вібратора осцилографа 1 мм/мА. Оцінити результуючу чутливість та відхилення променю вібратора.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Питання, що розглядаються

В роботі практично засвоюється порядок розрахунків вимірювальних перетворювачів неелектричних величин. Механічні вимірювальні перетворювачі. Електростатичні вимірювальні перетворювачі. Електромагнітні вимірювальні перетворювачі. Фотоелектричні вимірювальні перетворювачі. Теплові вимірювальні перетворювачі.

Теоретичні відомості

Під час контролю технологічних процесів та проведенні наукових досліджень необхідно проводити вимірювання різноманітних неелектричних величин, таких як, механічні, теплові, хімічні, акустичні, оптичні та тому подібне. Їх кількість суттєво перевищує кількість електричних та магнітних величин, що підлягають вимірюванням. Тому, можна говорити, що вимірювання неелектричних величин являє собою найбільшу та найрозвиненішу галузь інформаційно-вимірювальних технологій, а виробництво засобів вимірювальної техніки для різних неелектричних фізичних величин є основною частиною продукції приладобудування.

Здебільшого, неелектричні величини вимірюють шляхом перетворення їх в електричні величини, оскільки останні є найбільш зручними для передачі, підсилення, математичної обробки та точного вимірювання. Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювання неелектричних величин наведена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема електричного приладу для вимірювання неелектричних величин

Вимірювальна величина X надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача, де перетворюється в пропорційну їй електричну величину $X_{ел}$, яка лініями зв'язку подається на вторинний вимірювальний прилад. На лінії зв'язку, довжина яких в загальному випадку, може бути значною, впливають завади, які здійснюють вплив на сигнал $X_{ел}$. Це може внести істотну похибку до результату вимірювань. Крім того, в самих лініях зв'язку можуть відбуватися втрати вимірювальної інформації. В деяких випадках, особливо за малих рівнів вхідних сигналів первинного вимірювального перетворювача, перед лініями зв'язку ставлять вимірювальні підсилювачі, які можуть бути сумісними з первинними вимірювальними перетворювачами.

Показання x вимірювального перетворювача, який в більшості випадків виражається в одиницях вимірюваної фізичної величини X , може бути використаний як для візуального спостереження, так і для подальшого опрацювання у інформаційно-вимірювальній системі.

У первинному вимірювальному перетворювачі фактично відбувається перетворення енергії одного виду (механічної, теплової, звукової тощо) в інший (електричну). Це відбувається за рахунок впливу на електричні параметри первинного пасивного

вимірювального перетворювача або генерування електричного сигналу активного вимірювального перетворювача. В першому випадку зміна електричного параметру пасивного вимірювального перетворювача (наприклад, ємності, індуктивності, електричного опору) здійснюється шляхом механічного контакту або використанням фізичних залежностей. До таких перетворювачів відносяться резистивні, ємнісні, індуктивні. У другому випадку активними елементами перетворювачів генерується електричний сигнал, що містить енергетичну складову (струм, напругу, заряд), перетворюючи механічну, світлову, теплову або хімічну енергію. До таких перетворювачів, відносяться п'єзоелектричні, термоелектричні, гальваноманітні, індукційні та ін.. перетворювачі.

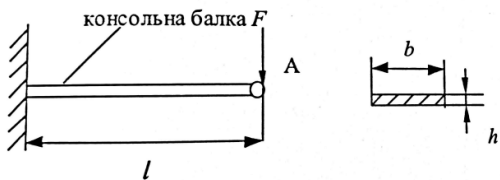
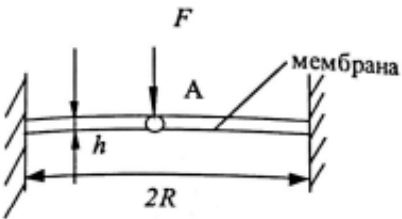
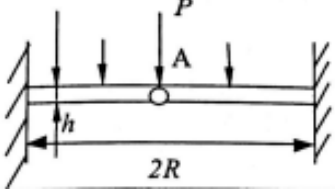
Таким чином, вимірювання неелектричних величин зводиться до вимірювань електричних параметрів, з якими неелектричні величини пов'язані відомими функціональними залежностями.

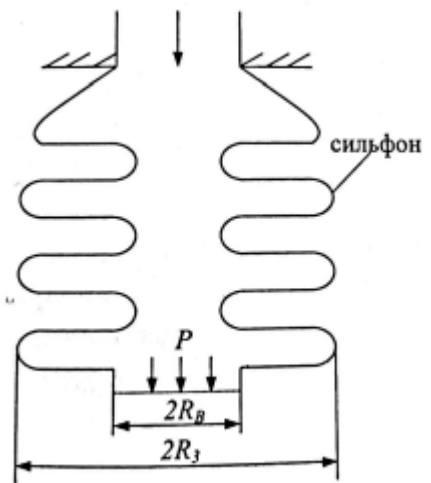
Електричні величини можуть бути виміряні аналоговими та цифровими вимірювальними вторинними приладами. До того ж, слід відмітити, що електричний сигнал може піддаватися додатковим операціям, таким, як підсилення до необхідного рівня, лінеаризація функції перетворення, корекція похибок.

Механічні вимірювальні перетворювачі

Принцип дії механічних вимірювальних перетворювачів полягає у перетворенні вхідних неелектричних величин, таких як зосередженої сили, моменту сил, тиску тощо, які безпосередньо діють на пружний елемент перетворювача, у деформацію або переміщення цього елемента. Останні безпосередньо сприймаються спостерігачем або перетворюються в електричні величини за допомогою інших перетворювачів. В таблиці 3.1 наведені типи найбільш поширеніших механічних перетворювачів та їхні функції перетворення.

Таблиця 3.1 – Механічні вимірювальні перетворювачі

Типи перетворювачів	Функції перетворення
Пружний перетворювач сили 	$\delta_A = f(F) = \frac{4l^3}{Eh^3b} F$
Мембранний перетворювач сили 	$\delta_A = f(F) = \frac{3(1-\mu)R^2}{4\pi Eh^3} F$
Мембранний перетворювач тиску 	$\delta_A = f(P) = \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16Eh^2} P$
Сильфонний перетворювач тиску	$\delta_A = f(P) = 2nA \frac{R_{cp}^2}{Eh^3} P$

	де n – кількість гофр; $R_{cp} = \frac{R_B + R_3}{2} ;$ $\frac{R_B}{R_3} = 1.5 \dots 2.0$ $A = 0,01 \dots 0,04$, якщо $\frac{R_B}{R_3}$; h – товщина сітки сильфона
Умовні позначення: δ_A – переміщення точки A (прогин точки A); E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона	

Резистивні вимірювальні перетворювачі

Принцип роботи резистивних вимірювальних перетворювачів полягає у зміні вихідного електричного опору перетворювача під дією вхідної неелектричної величини, наприклад, деформації або переміщення. До таких перетворювачів відносять тензорезисторні та реостатні перетворювачі.

В основі роботи *тензорезисторів* лежить явище тензоефекту, що полягає у зміні активного опору провідників при їх механічній деформації.

Тензорезистори конструктивно бувають наступних видів:

- дротяні;
- фольгові;
- плівкові;
- напівпровідникові дискретного типу;
- інтегральні напівпровідникові.

Області застосування тензорезисторів дуже різноманітні, але можна виділити дві основні:

1. Дослідження фізичних властивостей матеріалів, вимірювання деформацій та напруг у деталях машин елементах конструкцій. Для цих завдань характерні значні зміни параметрів довкілля, неможливість градування вимірювальних каналів. Основною причиною похибки у цих випадках є розкид параметрів тензорезисторів, дефекти наклейки тензорезисторів. Похибка 2...10%.

2. Вимірювання механічних величин, що перетворюються на деформацію пружного елемента. Це реалізується за допомогою спеціально виготовлених датчиків. У цьому випадку датчики градууються за величиною, що вимірюється, і похибки вимірювань лежать в діапазоні 0,5... 0,05%.

Механічні величини, які можуть вимірюватися за допомогою тензорезисторів: переміщення, зусилля, тиск, момент, вібрація та прискорення.

Реостатним перетворювачем називають реостат, двигун якого переміщається під дією неелектричної величини, що вимірюється. Природною вхідною величиною реостатних перетворювачів є рух двигуна, а вихідний - опір.

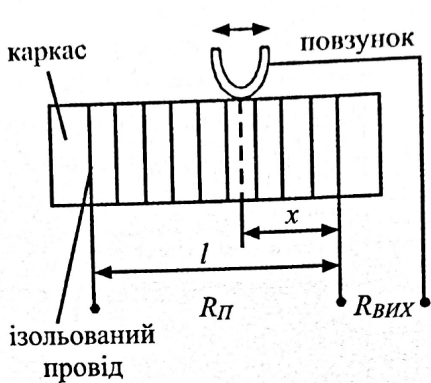
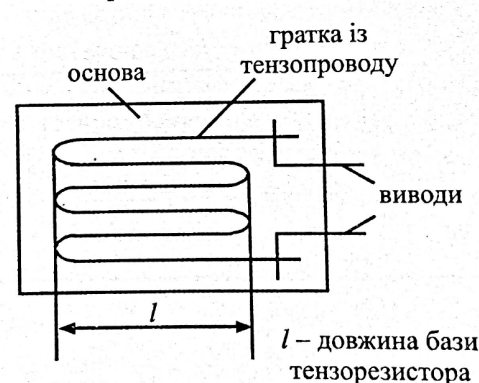
Реостатні перетворювачі виконуються як із дротом, намотаним на каркас, так і реохордного типу. Найчастіше використовується провід з різних сплавів платини, що мають підвищену корозійну стійкість і зносостійкість; застосовується також манганін, константан, фехраль. Мікропровід дозволяє виконувати мініатюрні перетворювачі, що мають габарити до 5x5 мм.

Каркас виконується з керамічних матеріалів, пластмаси, гетинаксу, металів (алюміній, дюраль), покритих шаром лаку чи оксидною ізоляцією. Каркас повинен мати велику тепловіддачу.

Існує велика різноманітність конструкцій реостатних перетворювачів переміщення. Вони можуть бути дротяними та недротяними. Дротові відрізняються високою точністю перетворення та стабільністю функції перетворення. Їх недоліки - низька роздільна здатність, невисокий опір (до десятків кілоом). Зазначені недоліки відсутні у дротяних перетворювачів, проте вони значно поступаються дротяним за точнісними характеристиками. Реостатні перетворювачі діляться також на перетворювачі з лінійним та обертальним переміщенням рухомого елемента.

В таблиці 3.2 наведені типи найбільш поширеніших резистивних перетворювачів та їхні функції перетворення.

Таблиця 3.1 – Резистивні вимірювальні перетворювачі

Типи перетворювачів	Функції перетворення
Реостатний перетворювачі <i>Реостатний перетворювач</i> 	$R_{вих} = f(x) = \frac{R_n}{l} x$ де R_n – повний опір перетворювача; l – його довжина; x – лінійне переміщення
Тензорезистивний перетворювач <i>Тензорезистивний перетворювач</i> 	$\varepsilon_R = k \cdot \varepsilon_l \quad \text{або} \quad \Delta R = k \frac{R}{l} \Delta l$ $k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}$ де ε_l – відносна зміна довжини бази тензорезистора ε_R – відносна зміна опору тензорезистора

Електростатичні вимірювальні перетворювачі

До електростатичних відносяться ємнісні та п'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі.

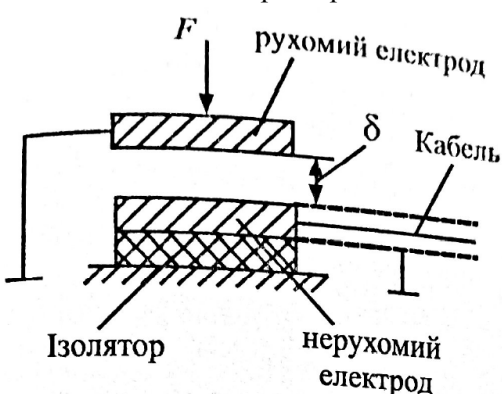
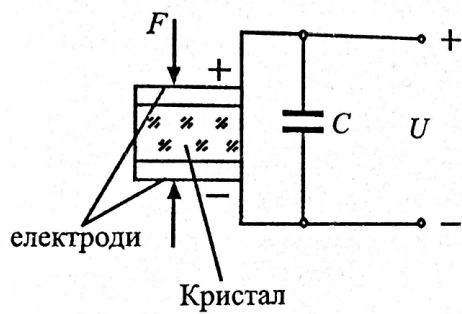
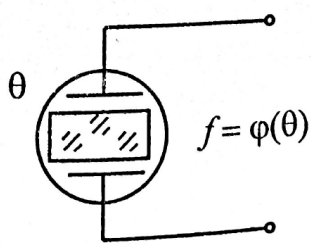
П'єзоелектричні перетворювачі призначені для вимірювання тільки динамічних та квазістатичних сил. Вони непридатні для вимірювання статичних сил. Принцип дії динамометрів базується на використанні п'єзоелектричного ефекту. Явище п'єзоелектричного ефекту полягає у виникненні електричних зарядів на відповідних гранях кристалічних тіл при їх деформуванні.

В ролі чутливих елементів динамометра застосовують пластинки, вирізані із п'єзокварца. В залежності від розташування площин розрізу відносно осей кристала, пластинки реагують на розтягувальні, стискуючі та зсувні сили.

Ємнісний перетворювач є плоским (або іншою формою) конденсатором, ємність якого залежить від площі електродів, їх взаємного розташування, відстані між ними, а також розмірів діелектрика та його діелектричної проникності. Ці перетворювачі можуть застосовуватися для вимірювання різних неелектричних величин, значення яких може бути пов'язане зі зміною однієї із зазначених вище величин, що визначають ємність перетворювача.

В таблиці 3.3 наведені типи найбільш поширеніших електростатичних вимірювальних перетворювачів та їхні функції перетворення.

Таблиця 3.3 – Електростатичні вимірювальні перетворювачі

Типи перетворювачів	Функції перетворення
Ємнісний перетворювачі 	$C = f(\delta) = \varepsilon_0 \varepsilon S \frac{1}{\delta},$ де $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала; ε – відносна діелектрична проникність середовища між електродами; S – площа електрода
П'єзоелектричний перетворювач сили 	$U = f(F) = \frac{d}{C} F,$ де d – п'єзоелектричний модуль; C – ємність, що утворена електродами
П'єзоелектричний перетворювач температури 	$f = \varphi(\theta) = f_0 \left[1 + k_1(\theta - \theta_0) + k_2(\theta - \theta_0)^2 + k_3(\theta - \theta_0)^3 \right]$ де f – частота коливань перетворювача; f_0 – власна частота його коливань при температурі θ_0; k_1, k_2, k_3 – сталі коефіцієнти

Електромагнітні вимірювальні перетворювачі

Принцип діє електромагнітних вимірювальних перетворювачів базується на зміні параметрів електромагнітного кола під дією неелектричних величин, що вимірюються. До них відносяться індуктивні, трансформаторні, індукційні та магнітопружні вимірювальні перетворювачі.

Магнітопружні перетворювачі застосовуються для вимірювання переважно великих (до 50 мН) розтягальних або стискуючих сил, які мають місце, наприклад, у прокатних станах металургійних виробництв. Вони здатні вимірювати сили як у статичному, так і у динамічному режимах з частотою до декількох кГц. До цього належить додати, що серед інших електричних силувимірювачів магнітопружні динамометри відрізняються низькою точністю. Похибка вимірювання знаходиться в межах 1...5 %. В зв'язку з цим їх застосовують головним чином для приблизних квазістатичних промислових вимірювань.

Принцип вимірювання сил такими динамометрами ґрунтується на застосуванні магнітопружного ефекту. Явище магнітопружного ефекту полягає в залежності магнітної проникності феромагнітних тіл від існуючих в них механічних напружень. Це явище отримало назву ефект Віллара.

Принцип дії *індуктивного перетворювача* заснований зміні індуктивності обмотки електромагнітного дроселя залежно від переміщення однієї з рухомих частин: якоря, сердечника та інших. Найпростішим індуктивним перетворювачем є котушка з повітряним зазором, що змінюється, його робота заснована на зміні магнітного опору магнітопроводу шляхом зміни довжини повітряного зазору.

Переваги: простота та надійність. Недолік: мінімальна чутливість, залежність індуктивного опору від частоти струму.

Індуктивні перетворювачі використовуються для вимірювання як статичних, так і динамічних стискуючих та розтягальних сил. Діапазон вимірювання досить широкий – нижня межа починається від 10 мН і навіть нижче, тоді як верхня – сягає 1 МН. Цим динамометрам, порівняно із тензорезисторними, властиві значно більші чутливість і вихідний вимірювальний сигнал. Вже при незначному навантаженні, яке складає всього лише 0,1% від номінального, на виході динамометра формується сигнал, достатній для його вимірювання без попереднього підсилення. Достатньо відмітити, що динамометри спроможні вимірювати деформації величиною всього лиш 1...2 мкм. Разом з цим точність вимірювання сил індуктивними динамометрами значно нижче, ніж тензорезисторними (максимальна похибка складає 0,5...1,5%).

Принцип дії *індукційних перетворювачів* полягає в явищі електромагнітної індукції, тобто. на виникненні електрорушійної сили (ЕРС) в електричній котушці за зміни магнітного поля. Таким чином, у них вимірюється віброшвидкість, оскільки саме вона викликає зміну магнітного поля датчика. Тому чутливість таких датчиків характеризується величиною напруга/віброшвидкості (В/м/с). До переваг індукційних перетворювачів можна віднести простоту конструкції та надійність в експлуатації. Основний їх недолік пов'язаний із принципом дії, що практично обмежує нижній діапазон вимірюваних частот межею 8 – 10 Гц. Крім того, індукційні перетворювачі мають значно більшу масу, ніж п'єзоелектричні, що знижує максимальне значення вимірюваних частот до 500 – 1500 Гц.

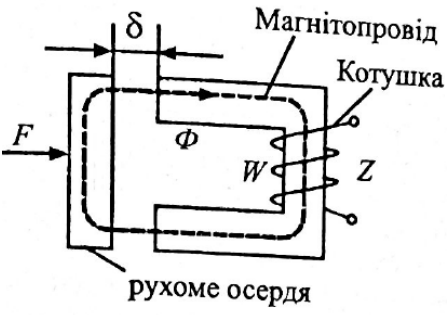
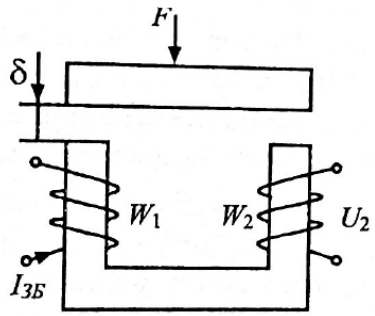
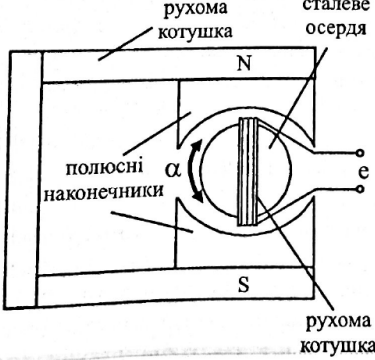
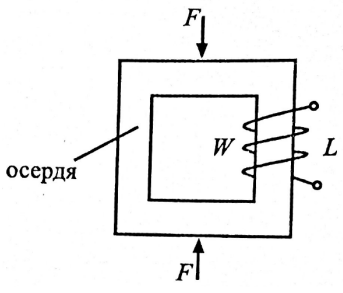
Конструктивно індукційний перетворювач складається з корпусу, сейсмічної маси на маятниковій або осьовій підвісці та індукційного елемента. При коливаннях сейсмічної маси відбувається відносне переміщення котушки та постійного магніту спеціальної форми, внаслідок чого в котушці наводиться ЕРС. Для підвищення чутливості перетворювача збільшують кількість витків котушки. Але збільшення числа витків призводить до підвищення реактивного опору котушки і збільшення маси перетворювача, а отже, зменшення частотного діапазону вимірювання з боку високих частот.

Трансформаторний перетворювач є трансформатором, у якого під впливом вхідного сигналу змінюється взаємна індуктивність, що призводить до зміни вторинної, вихідної напруги.

Розрізняють два види трансформаторних перетворювачів: з магнітним опором, що змінюється, і з постійним магнітним опором і рухомою обмоткою. Перетворювачі першого виду конструктивно аналогічні до індуктивних перетворювачів і відрізняються тим, що замість однієї мають дві обмотки. При зміні повітряного зазору змінюються магнітний опір і взаємна індуктивність. При цьому змінюється вторинна ЕРС.

В таблиці 3.4 наведені типи найбільш поширеніших електромагнітних вимірювальних перетворювачів та їхні функції перетворення.

Таблиця 3.4 – Електромагнітні вимірювальні перетворювачі

Типи перетворювачів	Функції перетворення
Індуктивний перетворювач 	$Z = f(\delta) = \omega W^2 \mu_0 S \frac{1}{2\delta},$ де Z – комплексний опір обвитки з кількістю витків W; ω – колова частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; S – площа поперечного перетину магнітопроводу; δ – довжина повітряного зазору; Φ – магнітний потік
Трансформаторний перетворювач 	$U = f(\delta) = \omega W_1 W_2 \mu_0 S I \frac{1}{2\delta},$ де I – струм збудження; S – площа поперечного перетину осердя; W_1, W_2 – кількість витків первинної та вторинної обвиток
Індукційний перетворювач 	$e = f(\alpha) = -BWS \frac{d\alpha}{dt},$ де B – індукція в робочому зазорі; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа рамки; d – діаметр рамки; W – кількість її витків; α – кутове переміщення рамки
Магнітопружний перетворювач 	$\Delta L = f(\sigma) = \frac{W^2}{\epsilon_1} \mu S k_\sigma \sigma,$ де ΔL – приріст індуктивності обвитки з кількістю витків W; σ – механічне напруження в осерді; μ – магнітна проникність матеріалу осердя; S – площа поперечного перетину осердя; k_σ – коефіцієнт магнітопружної чутливості; ϵ_1 – відносна деформація

Фотоелектричні вимірювальні перетворювачі

Принцип дії фотоелектричних перетворювачів базується на явищах зовнішнього та внутрішнього фотоефектів. Суть зовнішнього фотоефекту полягає в емісії (випусканні) електронів на поверхні фотокатода у вакуум під дією світлового потоку. Кванти світла досягають фото чутливої поверхні катода, викликають емісію фотоелектронів, які під дією

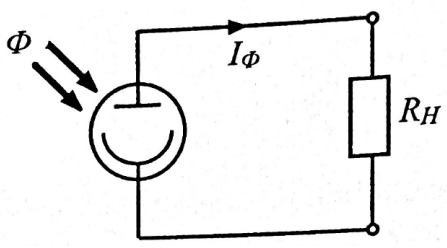
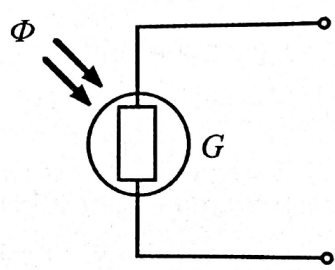
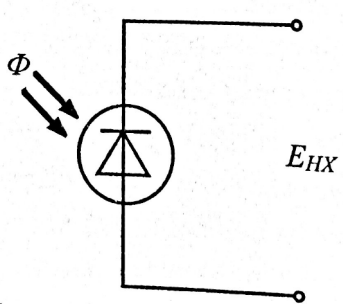
зовнішнього електричного поля створюють фотострум. На цьому принципі побудовані *електровакуумні фотоелементи, іонні фотоелементи та фотоелектричні помножувачі*.

Суть внутрішнього фотоефекту полягає у переміщенні звільнених під дією світла носіїв заряду (електронів та дірок) у середині твердого тіла (без виходу назовні), що веде до змінення електропровідності матеріалу або до виникнення фото-ЕРС. Перетворювачі, у яких під дією світлового потоку змінюється електропровідність, називаються *фоторезисторами*. Вони являють собою однорідну напівпровідникову пластинку, виготовлену із селеніду кадмію, сірчаного свинцю, сірчаного кадмію, тощо.

Другий тип перетворювачів із внутрішнім фотоефектом – це *фотогальванічні перетворювачі*, що являють собою електронні прилади з р-n-переходом, в якому під дією світлового потоку виникає фото-ЕРС. До них належать *фотодіоди та фототранзистори*. Вони, на відміну від фоторезисторів є генераторними перетворювачами.

Фотоелектричні перетворювачі використовують для вимірювання як світлових, так і несвітлових величин і є складовими елементами великої кількості приладів вимірювальної техніки та інформаційно-вимірювальних систем. В таблиці 3.5 наведені типи найбільш поширеніших фотоелектричних вимірювальних перетворювачів та їхні функції перетворення.

Таблиця 3.5 – Фотоелектричні вимірювальні перетворювачі

Типи перетворювачів	Функції перетворення
Електровакуумний фотоелемент 	$I_{\phi} = f(\Phi) = S_{\text{INT}} \Phi,$ де I_{ϕ} – фотострум; Φ – світловий потік; S_{INT} – інтегральна чутливість фотокатода;
Фоторезистор 	$G = f(\Phi) = \Phi \cdot \alpha,$ де G – електропровідність фоторезистора; Φ – світловий потік; α – коефіцієнт не лінійності енергетичної характеристики фотопровідності;
Фотодіод 	$E_{\text{НХ}} = f(\Phi) = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{S_I \Phi}{I_s} - 1 \right),$ де $E_{\text{НХ}}$ – фото-ЕРС; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; e – заряд електрона; S_I – чутливість; I_s – тепловий струм.

Практичні завдання

1. Навести схему пружного перетворювача сили та розрахувати значення сили F , якщо вигин в точці A 2 мм, довжина балки 100 мм, ширина 20 мм, товщина 1 мм. Модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа.
2. Навести схему мембранного перетворювача сили та розрахувати значення навантаження, якщо вигин мембрани в точці A 2 мм, діаметр мембрани 50 мм, товщина 0,5 мм. Модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа., коефіцієнт Пуассону 0,28.
3. Навести схему мембранного перетворювача тиску та розрахувати значення тиску, що діє на мембрану, якщо вигин мембрани в точці A 2 мм, діаметр мембрани 50 мм, товщина 0,5 мм. Модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа., коефіцієнт Пуассону 0,28.
4. Навести схем трансформаторного перетворювача та розрахувати довжину повітряного зазору, якщо напруга на вторинній обвитці 100 В, колова частота π , кількість витків первинної обвитки 10, вторинної - 20. Площина поперечного перетину сердечника 25 мм^2 . Струм збудження 1 А, магнітна проникність матеріалу сердечника $23 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.
5. Навести схему п'єзоелектричного перетворювача та визначити сили, що діє на нього, якщо напруга на електродах 1 В, п'єзоелектричний модуль $2,33 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, ємність, що утворена електродами 10^{-12} Ф.
6. Навести схему ємнісного перетворювача переміщення та розрахувати значення ємності, якщо відносна діелектрична проникність середовища 2,5 Ф/м, площа електродів 10 мм^2 , відстань між ними 0,2 мм.
7. Визначити значення тиску, що діє на сільфонний перетворювач, якщо вигин 1 мм, кількість гофр 4, внутрішній діаметр 8 мм, зовнішній 16 мм. Модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа, товщина сітки сільфон 5 мм. Навести схему перетворювача.
8. Навести схемку індуктивного перетворювача та розрахувати довжину повітряного зазору, якщо комплексний опір обвитки 10 Ом, кількість витків 20, колова частота π , площа поперечного перетину сердечника 25 мм^2 , магнітний потік 1 В.
9. Навести схему магнітопружного перетворювача та розрахувати необхідну кількість витків обвитки, щоб виконувалися наступні умови: приріст індуктивності обвитки при механічних напруженнях 10 кПа складає 1 Гн. Відносна деформація при цьому 2 мм, магнітна проникність матеріалу сердечника $23 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, площа поперечного перетину сердечника 25 мм^2 , коефіцієнт магнітопружної чутливості 1.

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

Питання, що розглядаються

В роботі практично засвоюється принципи вимірювання магнітних величин, правила розрахунків похибок вимірювання

Теоретичні відомості

Перетворювачі Холла та магніторезистивні сенсори

В основі дії гальваноманітної сенсорики лежать гальваноманітні ефекти, сутність яких полягає в зміні фізичних властивостей провідників чи напівпровідників при протіканні через них електричного струму й одночасному впливі на них магнетного поля. До них відносяться ефект Холла, магнеторезистивний ефект (ефект Гаусса), ефект Еттингсгаузена, та інші.

Ефект Холла – це фізичне явище, яке полягає в наступному. Якщо перпендикулярно площині пластини напівпровідника (рис. 7.1) і напрямку струму діє магнітне поле, то в пластині виникає ЕРС, пропорційна як струму I , так і напруженості H магнітного поля:

$$E = kIH,$$

де k – коефіцієнт, який залежить від матеріалу і товщини пластини.

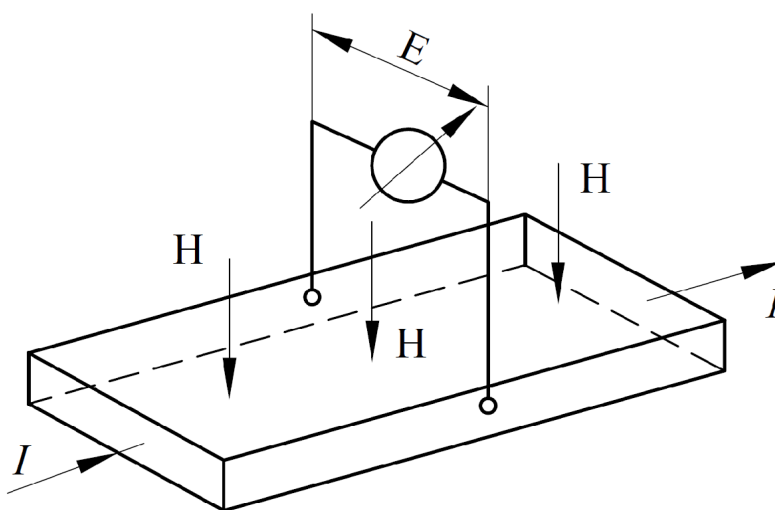


Рисунок 7.1 – До сутності ефекту Холла

Причина появи ЕРС Холла обумовлена тим, що на рухомі заряди в магнітному полі діє сила Лоренца. Струм в пластині – це і є упорядкований рух зарядів (в металі – електронів). Під дією магнітного поля вони зміщуються перпендикулярно напрямку свого руху, і поблизу однієї повздовжньої грані пластини виникає надлишок зарядів, а поблизу іншої – нестача. В звичайних провідникових матеріалах ЕРС Холла дуже мала, що пояснюється малою швидкістю (точніше – рухомістю) носіїв струму через їх велику концентрацію. Хоча *ефект Холла* відомий вже більше ста років, практичне використання його почалось в результаті розвитку технології виготовлення напівпровідників. Саме в чистих напівпровідниках забезпечується висока рухомість носіїв струму, тому постійна Холла для чистих напівпровідників набагато більша, ніж для металів.

Конструктивне виконання і геометричні розміри перетворювачів Холла можуть бути найрізноманітнішими. Найчастіше вони виготовляються у формі плоскої чотирикутної пластини. До поперечних граней такої пластини приєднуються електроди. До середин

подовжніх граней прилаштовані так називані холлівські (вихідні) електроди, виконані, як правило, у вигляді точкових контактів.

Викривлення траєкторії носіїв заряду під впливом магнітного поля викликає в гальваномагнітному елементі *гальванорезистивний ефект*, тобто ефект збільшення електричного опору в магнітному полі. Пояснюється це тим, що в присутності магнітного поля на носії струму діє сила Лоренца, яка змінює траєкторію їх руху. Якби не було магнітного поля, то під дією прикладеної до провідника напруги носії струму переміщувались би по найкоротшому напрямку. Зміна траєкторії під дією магнітного поля завжди подовжує шлях носіїв струму, що проявляється як збільшення опору. В сильних поперечних магнітних полях деякі речовини можуть мати відносне збільшення опору $\alpha = \Delta R / R$ в десятки разів. Кількісно цей ефект виявляється по-різному і залежить від матеріалу гальваномагнітного елементу та його форми. У провідникових матеріалах гальванорезистивний ефект виявляється слабо. Значно сильніше він проявляється у деяких напівпровідниках.

В основному датчики Холла і магніторезистивні датчики використовуються для вимірювання магнітних полів в дуже широкому діапазоні напруженості магнітного поля (від 1 до 10^9 А/м). За їх допомогою можна визначати криві намагнічування магнітних матеріалів, розподілення магнітних полів в електричних машинах і електромагнітних пристроях. В середніх і слабких магнітних полях датчики Холла дуже чутливі до коливань температури і потребують стабільних джерел живлення та складних вимірювальних схем. Наприклад, термо-ЕРС між матеріалом датчика і його выводами співвимірні з вихідним сигналом. Та й при вимірюваннях в сильних магнітних полях використовують схеми термокомпенсації похибок за допомогою терморезисторів, а деколи навіть і термостатування, тобто вимірювання проводять в камері, де автоматично підтримується постійна температура.

Магнітотранзисторні і магніотиристорні сенсори

Польовий магнітотранзистор конструктивно нічим не відрізняється від звичайного уніполярного транзистора з затвором, який являє собою один електронно-дірковий перехід. Якщо між відповідними електродами прикладена напруга, то електрони (основні носії заряду) дрейфують від істока до стоку та не можуть перебороти потенційний бар'єр на межі $p-n$ -переходу. Якщо тріод розташований таким чином, що площа електронно-діркового переходу паралельна, а струмопровідний канал перпендикулярний вектору магнітної індукції B , то електрони, що дрейфують вздовж струмопровідного каналу, під дією сили Лоренца будуть відхилятися в бік $p-n$ -переходу. Накопичення електронів в області $p-n$ -переходу приведе до зниження потенційного бар'єру й до звуження ділянки $p-n$ переходу, збідненої носіями заряду, а отже до розширення токопровідного каналу, та як наслідок – зменшення внутрішнього опору перетворювача. При зміні напрямку струму I або B виникає зворотнє явище. Як видно, відмінною особливістю полевих магнетотріодів є те, що їхній внутрішній опір може як зростати, так і зменшуватись в залежності від B .

Одноперехідні транзистори (ОПТ) діють на основі модуляції опору бази інжектованими із емітера носіями заряду, внаслідок чого вхідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) має вигляд S -типу. На рис. 7.2 зображена ВАХ одноперехідного магнетотранзистора (рис. 7.2, а) та його структура (рис. 7.2, б).

При розміщенні ОПТ в магнітному полі на інжектовані носії діє сила Лоренца, що відхиляє їх до стінок бази $\vec{a}_1$, $\vec{a}_2$ (або навпаки, залежно від напрямку магнітного поля та розмірів ОПТ). Оскільки швидкість рекомбінації нерівновісних носіїв на стінках бази більша,

ніж в об'ємі, це приводить до зміни напруги переключення U_0 (рис. 7.2, а). Залежність U_0 від магнітної індукції B може бути використана для побудови сенсора магнітного поля, що працює на постійному струмі. Але магніточутливість ОПТ в цьому режимі не більша, ніж чутливість магнітодіодів з довгою базою, конструкція і схема включення яких значно простіша.

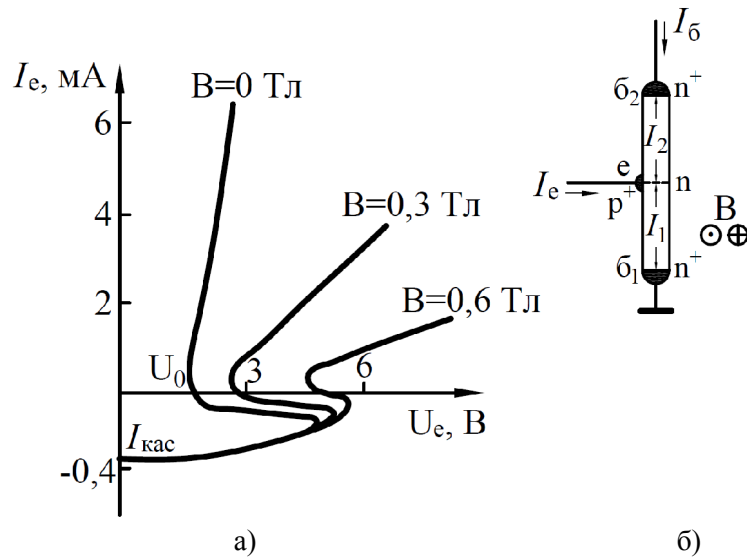


Рисунок 7.2 – Залежність ВАХ германієвих ОПТ від магнітної індукції

Значно більший інтерес становить використання в ролі сенсора магнітного поля генератора на основі ОПТ, оскільки в практичній електроніці ОПТ в основному використовуються в генераторах, для створення яких до ОПТ досить підключити ємність. Зарядка конденсатора відбувається зворотнім струмом емітерного $p-n$ -переходу, який слабо залежить від напруги, а розрядка проходить через опір нижньої частини бази ОПТ. Залежність амплітуди гармонічних коливань від магнітної індукції та структура такого сенсора наведена на рис. 7.3.

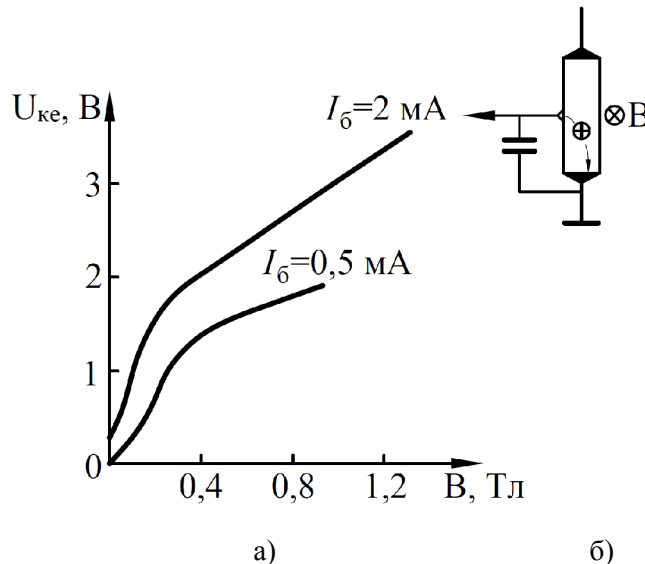


Рисунок 7.3– Залежність амплітуди гармонічних коливань від магнітної індукції (а) та структура сенсора (б)

На основі генератора на ОПТ може бути побудований сенсор магнітного поля з частотним виходом, тобто з залежністю частоти генерації від магнітного поля. Залежність частоти релаксаційних коливань від магнітної індукції та схема такого генератора показана на

рис. 7.4. ОПТ в ньому відрізняється від звичайного тим, що поряд з верхнім базовим електродом розташований додатковий інжекційний контакт. Інкєтовані із нього в базу носії рухаються в електричному полі в сторону контакта b_1 , і їх частина влучає в зворотнєзмещений емітер ОПТ (при зарядженні конденсатора), що збільшує його зворотній струм $I_{нас}$. В магнітному полі інжектовані носії відхиляються силою Лоренца в сторону емітера, що ще сильніше збільшує $I_{нас}$ та частоту f коливачь на емітері.

Частотний вихід датчика дає можливість значно спростити стикування давача з ЕОМ та мікромінізувати конструкцію пристрою вимірювання. Частоту генератора на ОПТ можнатокож змінювати шляхом освітлення бази ОПТ, змінюючи температуру, що надає можливість створювати прості вимірювачі інтенсивності світла та температури аналогічного принципу дії.

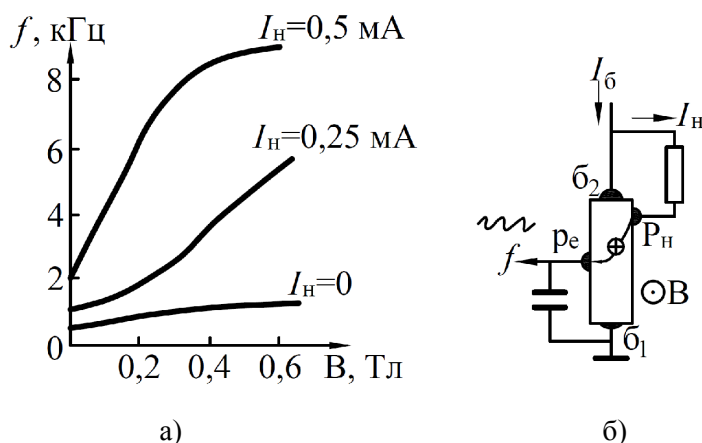


Рисунок 7.4 – Залежність частоти релаксаційних коливачь від магнітної індукції

В ролі біполярного магнітотранзистора (МТ) може бути використаний будь-який біполярний транзистор, хоча чутливість його при цьому буде невелика. Наприклад, для цього використовують біполярний транзистор, ввімкнений за схемою з загальною базою. Якщо між емітером і колектором прикладена напруга відповідної полярності і тріод знаходиться у полі з магнітною індукцією B , то на неосновні носії заряду – дірки, які інжектовані з емітера й дрейфують в області бази до колектора з деякою середньою швидкістю v , буде діяти сила Лоренца F . Траєкторія дірок викривляється, що приводить до збільшення ймовірності їх рекомбінації в базовій області. Як наслідок, зменшується їх середня концентрація p і зростає опір перетворювача, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора. Роль останнього ефекту збільшується із зменшенням ширини емітера та колектора, що забезпечує збільшення магнітоточливості. Найменша площа взаємного перекриття площин емітера та колектора, що визначається глибиною дифузії домішок, досягається в латеральній конструкції транзистора, тому вона і дає найбільшу магнітоточливість.

З метою підвищення чутливості у площинному біполярному магнітотранзисторі в область його бази можуть бути введені додатковий колектор або зона підвищеної рекомбінації. Конструкція двоколекторного магнітотранзистора (ДМТ) з розташованими із двох сторін бази колекторами наведена на рис. 7.5.

ДМТ, наприклад $p-n-p$ -типу працює наступним чином. При відсутності магнітного поля інжектовані із емітера дірки розподіляються порівну між колекторами (суцільні лінії на рис. 7.5 $B=0$), і їх струми рівні. В магнітному полі (пунктирні лінії) потік носіїв відхиляється в сторону колектора K_1 , його струм збільшується, а струм колектора K_2 – зменшується. Крім ефекту перерозподілу носіїв між колекторами в ДМТ діє також і ефект зміни ефективної довжини бази, що приводить до додаткового росту струму. В колекторі

K_2 , навпаки, цей ефект приводить до додаткового зменшення струму. При протилежному напрямі магнітного поля струм K_2 росте, а струм K_1 зменшується.

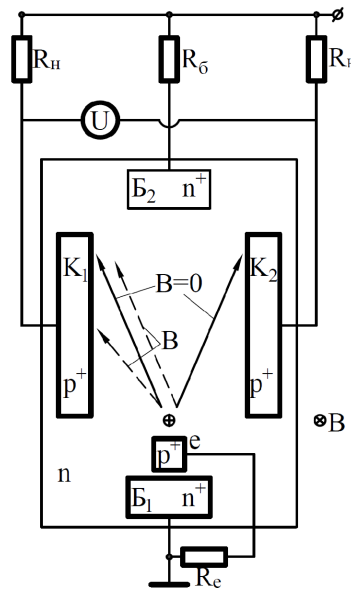


Рисунок 7.5 – Структурна схема включення двоколекторного магнітотранзистора

Очевидно, що при $B = 0$ різниця потенціалів між колекторами в симетричній схемі $U = 0$, з ростом магнітної індукції B напруга U збільшується. Таким чином, напруга U є функцією величини магнітного поля, а по її знаку можна знайти напрям B . Слід зауважити, що при проходженні струму основних носіїв між базовими контактами A_1 та A_2 в магнітному полі в обмеженій базі виникає ЕРС Холла, яка відхиляє інжектовані носії в ту ж сторону, що і сила Лоренца. Це збільшує магніточутливість ДМТ.

Значний вплив на чутливість ДМТ вносить дифузійне розмиття потоку інжектованих носіїв в сторону колекторів. Це приводить до того, що частина інжектованих носіїв змінює свою траєкторію в магнітному полі лише в межах одного колектора і не приймає участі в перерозподілі носіїв між колекторами, тому чутливість зменшується. Зменшення дифузійного розширення потоку носіїв може бути досягнуто шляхом створення в базі між колекторами сильнолегованої області, градієнта ширини забороненої зони від центру бази до колекторів, використання напівсферичного базового контакту A_1 та різноманітної форми колекторів. Такі заходи дозволяють на порядок збільшити магніточутливість ДМТ.

Давачем з планарною конструкцією ДМТ (рис. 7.5) можна виміряти тільки одну складову магнітного поля. Для вимірювання двох і трьох складових вектора магнітної індукції розроблені конструкції магнітотранзисторів з трьома колекторами, рознесеними по трьох сторонах бази кубічної форми. На основі таких магнітотранзисторів створені дослідні зразки електронних компасів, які не мають механічних переміщуючих елементів. З їх допомогою можна створювати системи, які автоматично управляють курсом руху любого пристрою в магнітному полі Землі. Висока чутливість ДМТ дозволяє їм реагувати на переміщення розташованого над ними постійного магніту. Цей ефект використовується для побудови давачів тиску та переміщення. В останньому випадку використовується лінійна матриця із ДМТ, причому одна колекторна область є спільною для двох сусідніх ДМТ. Матриця з коловим розташуванням ДМТ використовується в давачах кута повороту.

Магнітотиристири

Тиристор можна подати у вигляді еквівалентної схеми із двох транзисторів. Тобто розгляд магніточутливих властивостей тиристорів зводиться до розгляду магніточутливих властивостей складових транзисторів. Використовуючи замість одного із складових транзисторів магнітотранзистор, одержимо конструкцію магнітотиристора, напруга переключення якого управляється магнітним полем. На рис. 7.6. показана структура такого тиристора, причому для управляючого електроду (У) може бути використаний або контакт до бази n -типу, або контакт до бази P -типу.

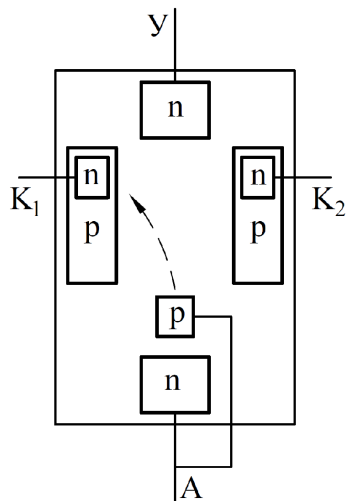


Рисунок 7.6 – Структура магнітотиристорного сенсора

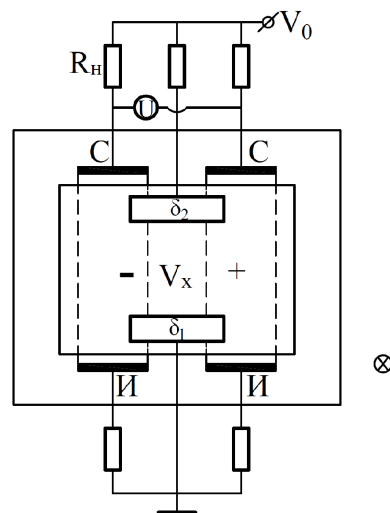


Рисунок 7.7 Магнітотранзисторний сенсор

Під дією магнітного поля інжектвані із анода носії відхиляються від колектора, що приводить до росту U . В протилежно направленому магнітному полі навпаки – носії відхиляються в сторону колектора та U зменшується. Струмом через управляючий електрод встановлюється необхідна величина U у відсутності магнітного поля (U_0).

На рис 5.10 показана структура сенсора магнітного поля на основі двох польових транзисторів зі спільним затвором – давачем Холла.

Практичні завдання

1. Оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання магнітного потоку $\Phi_x = 5$ мВб мілівеберметром М1119, з наступними метрологічними характеристиками якого: зведена похибка вимірювання $\pm 1,0$ %; межа вимірювання 1,0 мВб. Вимірювальна котушка має один виток опором 10 Ом.
2. Оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання індукції $B = 0,2$ Тл теслаамперметру типу Ф4355 з такими метрологічними характеристиками: верхня границя вимірювання 500 мТл; границя допустимої основної наведеної похибки $\pm 2,5$ %.
3. Оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання магнітного потоку $\Phi_x = 7,5$ мВб мілівеберметром М1119, з наступними метрологічними характеристиками якого: зведена похибка вимірювання $\pm 1,0$ %; межа вимірювання 1,0 мВб. Вимірювальна котушка має один виток опором 20 Ом.
- 4.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Питання, що розглядаються

В роботі практично засвоюється принципи вимірювання електричних величин за допомогою шунтів, додаткових резисторів, подільників напруги, вимірювальних трансформаторів, вимірювальних підсилювачів, перетворювачів середньовипрямлених, середньоквадратичних та амплітудних значень електричних сигналів, правила розрахунків похибок вимірювання

Теоретичні відомості

Шунти

Шунти призначені для розширення границь вимірювань магнітоелектричних приладів за струмом та являє собою чотиризатискачевий резистор (див. рис. 9.1), струмові затикачі С якого вмикають послідовно в коло вимірюваного струму I_x , а потенційні П – паралельно до вимірювального механізму чи приладу магнітоелектричної системи ВМ з внутрішнім опором R_{BM} , який переважно працює в режимі мілівольметра. Таким чином, шунт є перетворювачем струму в напругу.

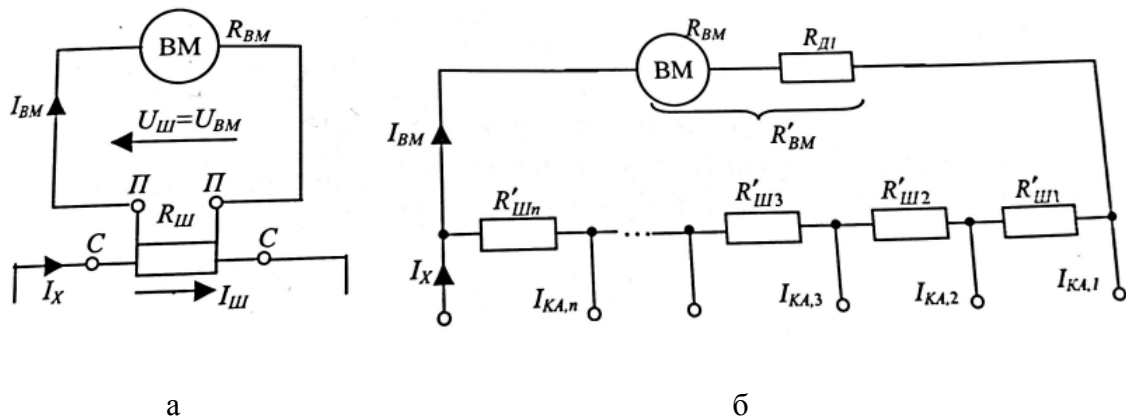


Рисунок 9.1 – Схеми увімкнення одно граничного (а) та багато граничного (б) шунтів

Для схеми, зображеної на рис 9.1,а, справедливі такі співвідношення:

$$R_{ш} = \frac{U_{ш}}{I_{ш}} = \frac{U_{BM}}{I_x - I_{BM}} = \frac{I_{BM} \cdot R_{BM}}{I_x - I_{BM}}, \quad (9.1)$$

де $R_{ш}$ – опір шунта;

$U_{ш}$ – спад напруги на шунті;

$I_{ш}$ – струм, що протікає через шунт;

I_x – вимірюваний струм;

R_{BM} – опір вимірювального механізму;

U_{BM} – спад напруги на вимірювальному механізмі;

I_{BM} – струм, що протікає через вимірювальний механізм

Шунти поділяються на внутрішні, що входять до складу вимірювального кола приладу та розміщені всередині його корпусу, і зовнішні, які є самостійними вимірювальними приладами. Як внутрішні, так і зовнішні шунти можуть бути одногранічними (рис. 9.1а) або багатогранічними (рис. 9.1 б) Зовнішні шунти, в свою чергу, бувають універсальними

(взаємозамінними) або індивідуальними (або частково взаємозамінними). Універсальні шунти використовуються в комплексі з будь-яким приладом, який має такий самий номінальний спад напруги, як і шунт. Індивідуальний, в свою чергу, - тільки з конкретними приладами. За призначенням шунти поділяються на стаціонарні та переносні.

Границю вимірювання I_{KA} побудованого на основі вимірювального механізму і універсального вимірювального шунта, зазвичай визначають за виразом:

$$I_{KA} = \frac{U_{шн}}{R_{шн}}, \quad (9.2)$$

При цьому обов'язково має виконуватися умова:

$$I_{BM, \max} \leq 0.003kI_{KA}, \quad (9.3)$$

де $I_{BM, \max}$ – струм повного відхилення приладу чи вимірювального механізму, що використовується з шунтом;

k – безрозмірне число, яке дорівнює класу точності приладу

Якщо застосовуються шунти, для яких умова (9.3) не виконується та струмом вимірювального механізму нехтувати неможна, границю побудованого амперметра визначають за формулою:

$$I_{KA} = \frac{U_{шн}}{R_{шн}} + I_{BM, \max}, \quad (9.4)$$

Номінальне значення опору шунта і границю вимірювання побудованого амперметра можна визначити також, використовуючи значення коефіцієнту шунтування $k_{ш}$, який показує, у скільки разів розширюється границя вимірювання приладом:

$$k_{ш} = \frac{I_{KA}}{I_{BM \max}} = \frac{R_{шн} + R_{BM}}{R_{шн}}. \quad (9.5)$$

Похибка внутрішнього шунта входить до основної похибки приладу, до вимірювальної системи якого входить сам шунт. Зовнішні шунти, в свою чергу, є самостійними вимірювальними приладами, мають свій клас точності, який позначають одним числом c , що дорівнює границі відносної основної похибки шунта, тобто:

$$\delta_{ш, \varepsilon p} = \pm \frac{\Delta R_{ш, \varepsilon p}}{R_{ш}} \cdot 100\% = \pm c \quad (9.6)$$

де $\Delta R_{ш, \varepsilon p}$ – границя допустимої абсолютної основної похибки шунта

Додаткові резистори

Резистор, увімкнений послідовно з вимірювальним механізмом, який призначений для вимірювання напруги і обертальний момент якого залежить від струму, називається додатковим резистором. Це перетворювачі напруги в струм. Вони використовуються для розширення меж вимірювання за напругою вольтметрів магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної систем, а також приладів, які мають кола напруги (фазометрів, ватметрів, лічильників електричної енергії).

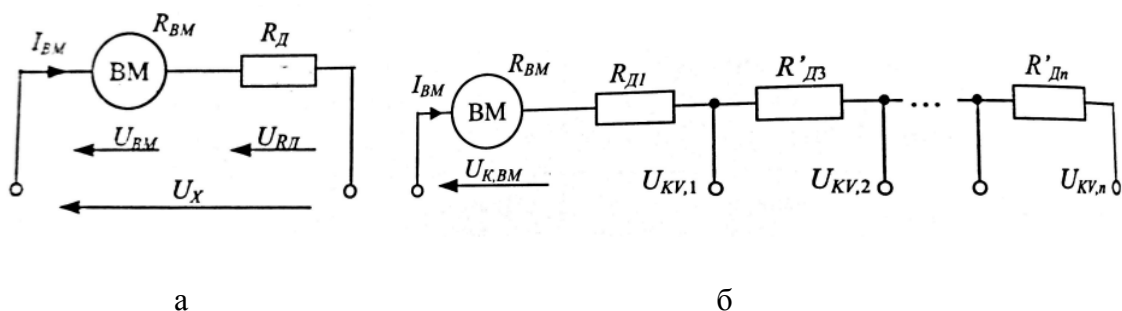


Рисунок 9.2 – Схеми увімкнення одногранічного (а) та багатогранічного (б) додаткових резисторів

Додатковий резистор R_D вмикають послідовно з вимірювальним механізмом ВМ, а його опір визначають за такою формулою:

$$R_D = \frac{U_{R_D}}{I_{BM}} = \frac{U_X - U_{BM}}{I_{BM}}, \quad (9.7)$$

де R_D – опір додаткового резистора;

U_{R_D} – спад напруги на додатковому резисторі;

U_X – вимірювана напруга;

U_{BM} – спад напруги на вимірювальному механізмі;

I_{BM} – струм, що протікає через вимірювальний механізм

Додаткові резистори поділяються на внутрішні, що входять до складу вимірювального кола приладу та розміщені всередині його корпусу, і зовнішні, які є самостійними вимірювальними приладами. Як внутрішні, так і зовнішні додаткові резистори можуть бути одногранічними (рис. 9.2 а), так і багатогранічними (рис. 9.2 б). Зовнішні додаткові резистори, в свою чергу, бувають універсальними (взаємозамінними) або індивідуальними (або частково взаємозамінними). Універсальні додаткові резистори використовуються в комплексі з будь-яким приладом за умови, що його струм повного відхилення дорівнює номінальному струмові додаткового резистора. Індивідуальні, в свою чергу, - тільки з конкретними приладами. За призначенням додаткові резистори поділяються на стаціонарні та переносні.

Межі вимірювання вольтметра, побудованого на основі вимірювального механізму та додаткового резистора, можна визначити за допомогою виразу:

$$U_{KV} = U_{K,BM} + I_{BM,H} \cdot R_{DH} = I_{BM,H} (R_{BM} + R_{DH}) \quad (9.8)$$

де U_{KV} – границя вимірювання вольтметра, побудованого на основі вимірювального механізму та додаткового резистора;

$U_{K,BM}$ – границя вимірювання вимірювального механізму, чи вольтметра, до якого під'єднують додатковий резистор;

$I_{BM,H}$ – струм повного відхилення вимірювального механізму, чи вольтметра, до якого під'єднують додатковий резистор;

R_{BM} – опір вимірювального механізму, чи вольтметра, до якого під'єднують додатковий резистор;

R_{DH} – номінальне значення опору додаткового резистора.

Номінальне значення опору додаткового резистора і границю вимірювання побудованого вольтметра можна знайти також використовуючи значення коефіцієнта розширення, який показує, у скільки разів розширюється границя вимірювання приладу.

$$k_p = \frac{U_{KV}}{U_{K,BM}} = \frac{R_{oH} + R_{BM}}{R_{BM}} \quad (9.9)$$

Додаткові резистори виготовляють з манганінового ізолюваного проводу, намотаного на пластини або каркаси із ізоляційного матеріалу. Похибка внутрішнього додаткового резистора входить до основної похибки приладу, до вимірювальної системи якого входить сам додатковий резистор. Зовнішні додаткові резистори, в свою чергу, є самостійними вимірювальними приладами, мають свій клас точності, який позначають одним числом c , яке дорівнює границі відносної основної похибки додаткового, тобто:

$$\delta_{o,zp} = \pm \frac{\Delta R_{o,zp}}{R_{oH}} \cdot 100\% = \pm c \quad (9.10)$$

де $\Delta R_{o,zp}$ – границя допустимої абсолютної основної похибки додаткового резистора

Подільники напруги

Подільники напруги – це масштабний вимірювальний перетворювач, призначений для зменшення напруги у задану кількість разів. Вони використовуються на постійному та змінному струмі для розширення границь вимірювань за напругою приладів з великим вхідним опором, таких як, наприклад, цифрові вольтметри, компенсатори постійного і змінного струму та компараторів напруги. У вимірювальній техніці застосовують резистивні, ємнісні та індуктивні подільники напруги.

Коефіцієнт поділу подільників напруги можна розрахувати за такою формулою:

$$k_n = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{R_{вх}}{R_{вих}} \quad (9.11)$$

де $U_{вх}$ – вхідна напруга;

$U_{вих}$ – вихідна напруга;

$R_{вх}$ – вхідний опір;

$R_{вих}$ – вихідний опір.

Номінальний коефіцієнт поділу дорівнює відношенню номінальних значень зазначених величин:

$$k_{nn} = \frac{U_{вхн}}{U_{вихн}} = \frac{R_{вхн}}{R_{вихн}} \quad (9.12)$$

Різниця між істинним та номінальними значеннями коефіцієнту поділу подільників напруги призводить до виникнення похибки, яка нормується у відсотках від номінального коефіцієнту поділу:

$$\delta_{nn} = \frac{k_{nn} - k_n}{k_{nn}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{U_{вх}}{k_{nn} \cdot U_{вих}} \right) \cdot 100\% \quad (9.13)$$

На змінному струмі коефіцієнт поділу в загальному випадку є комплексною величиною та може бути виражено через співвідношення повних комплексних вхідного та вихідного опорів:

$$k_n = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{Z_{вх}}{Z_{вих}} \quad (9.14)$$

Між вхідною та вихідною напругами у такому разі виникає кут зсуву, який є кутовою похибкою подільника напруги. крім цього, залежність комплексних опорів елементів схем подільника від частоти вхідної напруги може призвести до виникнення частотної похибки подільника. На практиці під час побудови подільника напруги змінного струму намагаються досягти виконання умов пропорційності складових вхідного та вихідного опорів подільника:

$$\frac{R_{вх}}{R_{вих}} = \frac{L_{вх}}{L_{вих}} = \frac{C_{вх}}{C_{вих}} \quad (9.15)$$

де $L_{вх}$ – індуктивність вхідного комплексного опору;

$L_{вих}$ – індуктивність вихідного комплексного опору;

$C_{вих}$ – ємність вихідного комплексного опору;

$C_{вх}$ – ємність вхідного комплексного опору;

У такому разі подільник напруги є частотно-незалежним і у ньому відсутні частотна та кутова похибки.

Клас точності подільника напруги позначають одним числом c , яке дорівнює границі допустимої відносної основної похибки подільника, тобто:

$$\delta_{нн, зр} = \frac{\Delta k_{н, зр}}{k_{нн}} \cdot 100\% = \pm c\% \quad (9.16)$$

де $\Delta k_{н, зр}$ - границя допустимої абсолютної основної похибки подільника напруги.

Резистивні подільники напруги

Схема найпростішого резистивного подільника напруги наведена на рисунку 9.3.

За умови, що навантаження подільника нескінченного велике, тобто, в режимі неробочого ходу, коефіцієнт поділу такого подільника дорівнює:

$$k_n = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (9.17)$$

Резистивні подільники можуть бути одногранічними (рис. 9.3 а) та багатогранічними з постійним вхідним (рис. 9.3 б) або постійним вихідним (рис. 9.3 в) опором.

Відносна похибка такого подільника розраховується за формулою:

$$\delta_{нн} = \frac{1}{k_n} (\delta_{R1} - \delta_{R2}) \quad (9.18)$$

де δ_{R1} та δ_{R2} – відносні похибки відповідних резисторів, зумовлені відхиленням дійсних значень їх опорів від номінальних.

Таким чином, точність резистивних подільників напруги переважно залежить від похибок підгонки дійсних значень опорів резистивних елементів подільника від номінальних. Крім того, слід зазначити, що, оскільки до виразу (9.17) входить відношення опорів R_1 та R_2 , то до точності підгонки окремих опорів не ставлять високі вимоги, а з високою точністю досягають їх відношення, що на практиці значно легше, оскільки в такому разі систематичні складові похибок взаємно компенсуються. У зв'язку цим, можна стверджувати, що резистивні подільники напруги є високоточними засобами вимірювальної техніки.

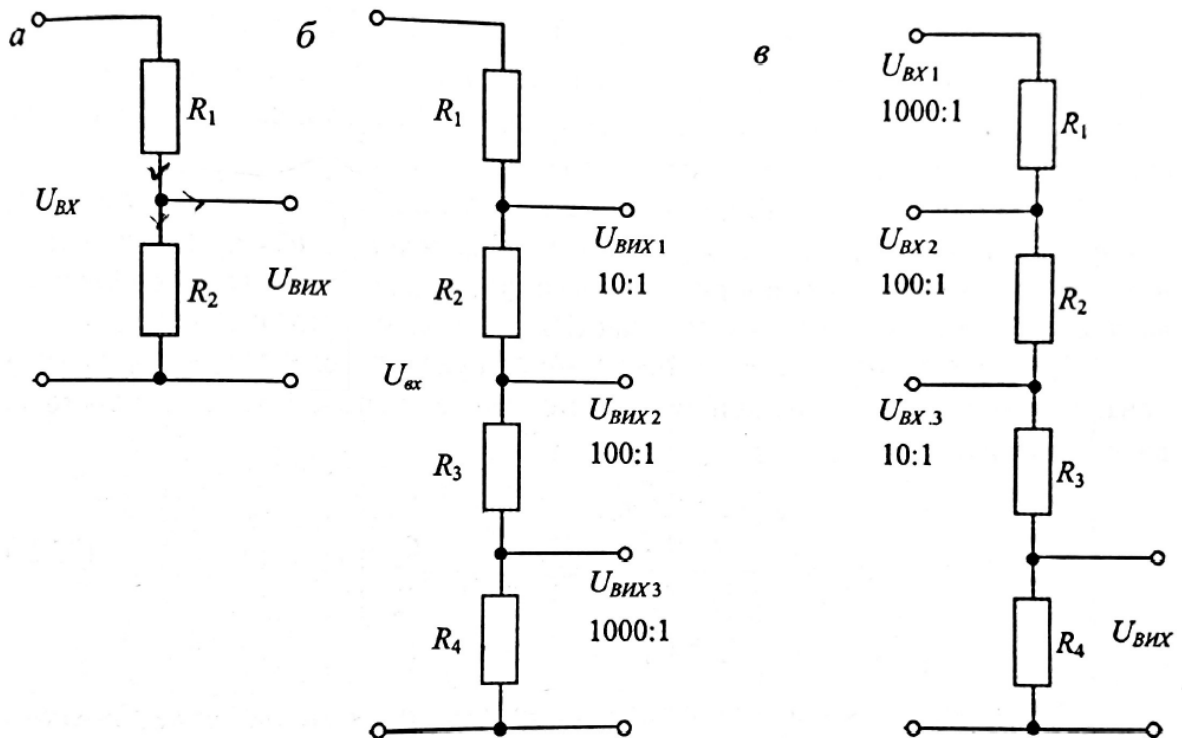


Рисунок 9.3 – Схеми одногранічного (а) та багатогранічного (б та в) резистивних подільників напруги

Ще одним фактором, що впливає на точність резистивних подільників напруги, є зміна температури навколишнього середовища. Це викликає виникнення додаткової температурної похибки. Необхідно відмітити також наявність реактивних складових опорів, що призводить до додаткових частотних похибок в разі застосування резистивних подільників напруги в колах змінного струму.

На дійсне значення коефіцієнту поділу резистивного подільника напруги також впливає опір навантаження R_n .

$$k_n = 1 + \frac{R_2}{R_n} \quad (9.19)$$

Такий вплив призводить до виникнення методичної похибки шунтування, для зменшення якої необхідно, щоб опір навантаження був значно більшим за вихідний опір подільника. Тобто подільники напруги можуть бути застосовані для розширення меж вимірювань приладів з великим опором.

При використанні подільників напруги для розширення меж вимірювання приладів за напругою, в якості необхідного значення коефіцієнту поділу обирають найближче з ряду стандартних значень, яке обирають, виходячи з умови:

$$k_{nn} \geq k_n = \frac{U_x}{U_{ки}} = \frac{R_{ex}}{R_{вix}}, \quad (9.20)$$

де U_x – значення вимірюваної напруги;

$U_{ки}$ – границя вимірювання приладу, що використовується в комплексі з подільником напруги.

Вихідна напруга подільника не повинна перевищувати границі вимірювання приладу.

Індуктивні подільники напруги

Індуктивний подільник напруги – це масштабний електромагнітний перетворювач, який містить одну або декілька обвиток, розміщених на феромагнітному осерді, та призначений для зменшення вхідної напруги у задану кількість разів.

Принцип роботи індуктивних подільників напруги базується на явищі електромагнітної індукції, причому, характерною особливістю є наявність між витками обвиток тісного індуктивного зв'язку, ідеальним варіантом якого є стан, коли всі витки обвиток мають однакове потокозчеплення, а потоки розсіювання відсутні. За такої умови відношення напруг, наведених в об витках подільника, дорівнює відношенню кількості витків відповідних обвиток і не залежить від точності відтворення та стабільності електричних і магнітних параметрів подільника. Це дає можливість говорити про високу точність. Однак, при реальних умовах потоки розсіювання не можуть бути повністю усунені і їх наявність є однією із основних причин виникнення похибок індуктивних подільників напруги. На практиці для досягнення високого рівня індуктивного зв'язку між об витками та зменшення потоків розсіювання в індуктивних подільниках напруги використовують обвитки у формі джгута із скручених та ізольованих один від одного проводів, який рівномірно намотують на осердя тороїдної форми, що виготовлено із матеріалу з високою магнітною проникністю і малими втратами.

Номінальний коефіцієнт передачі індуктивного подільника напруги може бути розрахований за формулою:

$$k_n = \frac{U_{вix}}{U_{ex}} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (9.21)$$

а номінальний коефіцієнт поділу, який є величиною, оберненою до коефіцієнта передачі:

$$k_{nn} = \frac{1}{k_n} = \frac{U_{ex}}{U_{вix}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (9.22)$$

де ω_1 та ω_2 – відповідно кількість витків вхідної та вихідної обвиток.

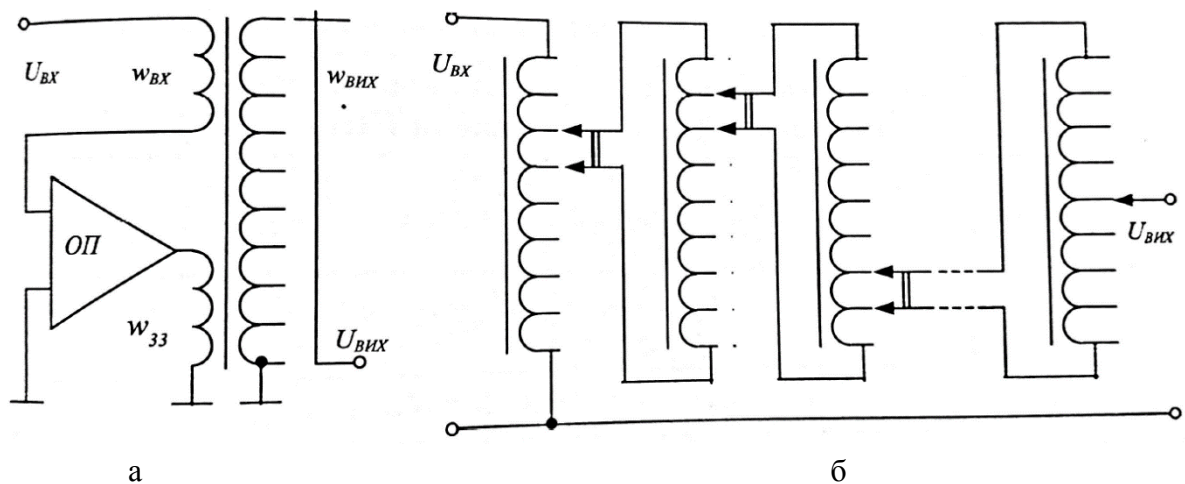
Однак, в реальних умовах експлуатації відношення напруги, що наводяться в об витках індуктивного подільника напруги, залежить від його електричних та магнітних параметрів, а також опору навантаження. Це призводить до виникнення похибки коефіцієнта передачі, яка є комплексною величиною та має активну (синфазну з вхідною напругою) і реактивну складову (зміщену на 90° відносно вхідної напруги). Для описання цих похибок на практиці використовують модуль похибки коефіцієнту передачі та фазове зміщення. Модуль похибки практично дорівнює активній складовій похибки коефіцієнта передачі та визначається за формулою:

$$\delta_{\text{пн.ср}} = \sqrt{\delta_{\text{пн.а}}^2 + \delta_{\text{пн.р}}^2}, \quad (9.23)$$

Фазове зміщення дорівнює куту між векторами вхідної і вихідної напруги подільника. Його апроксимують відношенням реактивної складової похибки до номінального значення коефіцієнта передачі і вказують в мікрорадіанах.

Необхідно відмітити, що модуль похибки коефіцієнта передачі індуктивного подільника напруги впливає на точність показань усіх засобів вимірювальної техніки, що під'єднані до його виходу, а фазова похибка – тільки на показання фазочутливих приладів, наприклад, ватметрів компенсаторів змінного струму і т.п.

За кількістю ланок (декад) індуктивні подільники напруги класифікують на однодекадні та багато декадні (рис. 9.4).



Рисунбок 9.4 – Схема однодекадного (а) та багато декадного (б) індуктивних подільників напруги

Ємнісні подільники напруги

На рисунку 9.5 наведена схема найпростішого ємнісного подільника напруги.

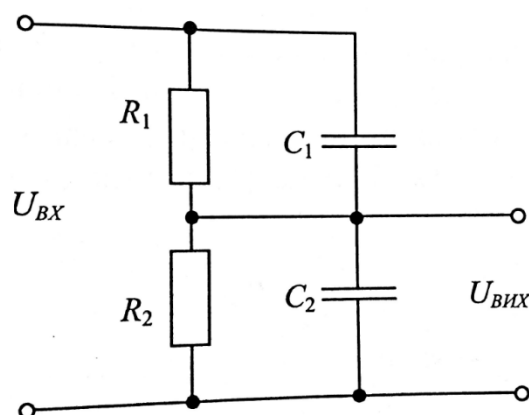


Рисунок 9.5 – Схема ємнісного подільника напруги

Номінальний коефіцієнт поділу ємнісного подільника напруги, за умови, коли навантаження подільника нескінченно велике (в режимі неробочого ходу), визначається формулою:

$$k_m = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{Z_{c1} + Z_{c2}}{Z_{c2}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}, \quad (9.24)$$

а дійсний комплексний коефіцієнт поділу з урахуванням реальних параметрів конденсаторів

$$k_n = \frac{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \right) + C_2 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_2 R_2} \right)}{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \right)}, \quad (9.25)$$

де C_1, C_2 – ємності конденсаторів;

R_1, R_2 – опори ізоляції відповідних конденсаторів;

ω – колова частота.

Видно, що коефіцієнт поділу залежить від колової частоти. Однак, на досить високих

частотах, коли $\frac{1}{j\omega C_1 R_1} \ll 1$ та $\frac{1}{j\omega C_2 R_2} \ll 1$, коефіцієнт поділу дорівнює:

$$k_n = k_m = \frac{C_1 + C_2}{C_1}, \quad (9.26)$$

а на дуже низьких частотах, коли $\omega \rightarrow 0$ та $\frac{1}{j\omega C_1 R_1} \gg 1$ та $\gg 1$, коефіцієнт поділу дорівнює:

$$k_n = k_m = \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \quad (9.27)$$

Тобто, в таких випадках коефіцієнт поділу ємнісного подільника напруги не буде залежати від колової частоти.

В ємнісних подільниках, що працюють в широкому діапазоні частот, з метою забезпечення незалежності коефіцієнта поділу від частоти конденсатори шунтують резисторами в такий спосіб, щоб виконувалась вимога:

$$\frac{R'_1}{R'_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (9.28)$$

де R'_1 та R'_2 – сумарні еквівалентні опори, що шунтують відповідно конденсатори C_1 та C_2 .

Ємнісні подільники напруги використовують здебільшого для розширення меж вимірювання електростатичних вольтметрів.

Вимірювальні трансформатори

Вимірювальний трансформатор – це масштабний електромагнітний перетворювач, призначений для точного перетворення (трансформації) струму чи напруги, а також для

захисту персоналу при вимірюваннях в колах високої напруги. У вимірювальній техніці застосовують вимірювальні трансформатори струму та вимірювальні трансформатори напруги для розширення меж вимірювання за струмом та напругою відповідних вимірювальних приладів: амперметрів, вольтметрів, ватметрів тощо.

За принципом дії та конструкцією вимірювальні трансформатори подібні силовим, але відрізняються від них режимом роботи та способами увімкнення у вимірювальне коло. На рисунку 9.6 наведена конструкція та умовні позначення вимірювальних трансформаторів.

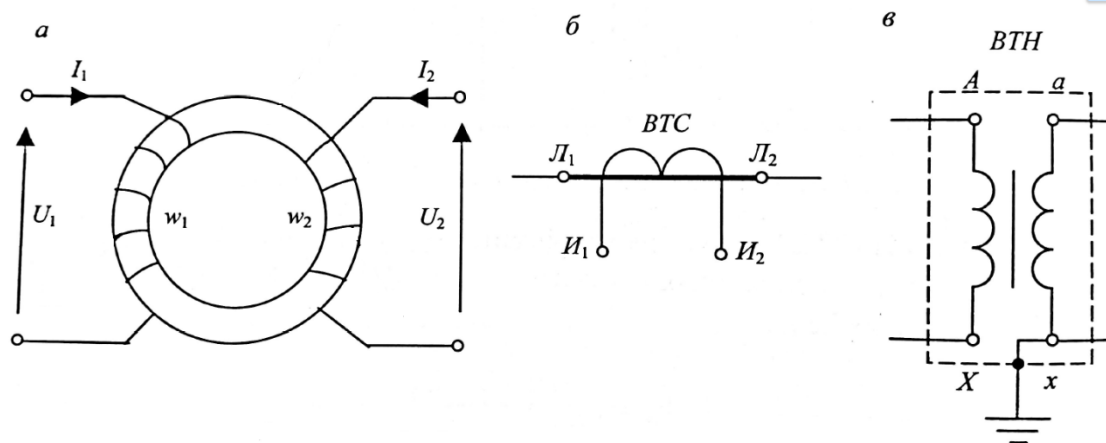


Рисунок 9.6 – Конструкція (а) та умовні позначення вимірювальних трансформаторів струму (б) та напруги (в)

Розглянемо конструкцію вимірюваних трансформаторів. На феромагнітному осерді намотані ізольовані одна від одної дві обвитки: первинна – w_1 , яку вмикають в коло вимірювальної величини (сили струму або напруги), та вторинна – w_2 , до якої приєднують вимірювальний прилад.

Первинну обвитку вимірювального трансформатора струму позначають великими літерами «Л₁» (початок) та «Л₂» (кінець), а вторинну – «І₁» (початок) та «І₂» (кінець). Первинну обвитку вимірювального трансформатора напруги позначають великими літерами «А» (початок) та «Х» (кінець), а вторинну – малими літерами «а» (початок) та «х» (кінець) (рис. 9.6).

Вимірювальні трансформатори струму працює при малих навантаженнях вторинної обвитки (десяті частки Ома), тобто, в режимі, близькому до короткого замикання, а вимірювальні трансформатори напруги – в режимі, близькому до режиму неробочого ходу.

Вимірювальні трансформатори струму

Вимірювальні трансформатори струму застосовують для розширення меж вимірювання за струмом амперметрів, ватметрів, лічильників електричної енергії, фазометрів та інших засобів вимірювальної техніки на змінному струмі.

Номінальний коефіцієнт трансформації вимірювальних трансформаторів струму розраховується за формулою:

$$k_{in} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad \text{або} \quad k_{in} = \frac{W_2}{W_1} \quad (9.29)$$

де I_{1n} та I_{2n} – первинний номінальний струм та вторинний номінальний струм відповідно.

До вторинної обвитки вимірювального трансформатора струму підключають вимірювальні прилади, опір яких невеликий, тобто, цей масштабний перетворювач працює в режимі, близькому до режиму короткого замикання. Необхідно відмітити, що під'єднувати до вторинної обвитки вимірювального трансформатора струму об'єкти з великим опором строго заборонено і, особливо, розмикати її під час вимірювання, оскільки в такому разі напруга на вторинній обвиті досягає сотень вольт, що може призвести до руйнування масштабного перетворювача та є небезпечним для персоналу.

Вимірювальним трансформаторам струму властиві два види похибок: струмова похибка, яку виражають у відсотках, і кутова похибка, яку виражають у радіанах, або кутових хвилинах.

Струмова похибка зумовлена різницею між номінальним та дійсним коефіцієнтом трансформації та може бути розрахована за формулою:

$$f_i = \frac{k_{in} - k_i}{k_i} \cdot 100\% \quad (9.30)$$

Дійсний коефіцієнт трансформації не є сталим, а залежить від режиму роботи трансформатора: дійсного значення струму в обвитці, значення та характеру навантаження вторинного кола, частоти, тощо. Відповідно, від цих величин залежить і значення струмової похибки.

Кутова похибка зумовлена тим, що у реальних трансформаторах на відміну від ідеальних, вектор вторинного струму повернутий відносно первинного не точно на 180° . Вона дорівнює куту між векторами первинного струму та поверненим на 180° вектором вторинного струму. Кутову похибку вважають додатною, якщо вектор первинного струму відстає від поверненого на 180° вектору вторинного струму.

Струмова похибка впливає на точність вимірювання всіх вимірювальних приладів, що працюють із вимірювальним трансформатором струму, а кутова – тільки на точність фазочутливих приладів.

Схема увімкнення вимірювального трансформатора струму для вимірювання сили струму наведена на рисунку 9.7.

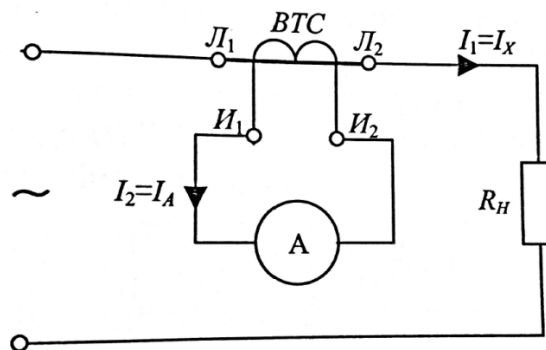


Рисунок 9.7 – Схема увімкнення вимірювального трансформатора струму для вимірювання сили струму

З рисунку видно, що первинну обвитку трансформатора вмикають послідовно із споживачем, струм в якому необхідно вимірювати. До вторинної обвитки підключається амперметр (струмове коло ватметра, лічильника електричної енергії, фазометра тощо).

Вимірювальні трансформатори струму у вимірювальних колах використовують в таких випадках:

- Для зменшення струму у вимірювальному приладі, якщо вимірювальний струм перевищує межу вимірювання приладу;

- Для збільшення струму у вимірювальному приладі, якщо вимірювальний струм значно менший за межу вимірювання приладу;
- Для захисту обслуговуючого персоналу і вимірювальних приладів при вимірюваннях в колах високої напруги.

Значення вимірюваного струму знаходять, виходячи із виразу:

$$I_x = I_A k_{in}, \quad (9.31)$$

де I_A – показання амперметра;

k_{in} – номінальний коефіцієнт трансформації.

Вимірювальні трансформатори напруги

Вимірювальні трансформатори напруги використовують для розширення меж вимірювання за напругою вольтметрів, ватметрів, лічильників електричної енергії, фазометрів та інших приладів на змінному струмі.

Номінальний коефіцієнт трансформації вимірювальних трансформаторів напруги розраховується за формулою:

$$k_{un} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad \text{або} \quad k_{un} = \frac{W_1}{W_2} \quad (9.32)$$

де U_{1n} та U_{2n} – первина номінальна напруга та вторинна номінальна напруга відповідно.

Вимірювальним трансформаторам напруги, подібно до вимірювальних трансформаторів струму, властиві два види похибок: струмова похибка, яку виражають у відсотках, і кутова похибка, яку виражають у радіанах, або кутових хвилинах.

Струмова похибка зумовлена різницею між номінальним та дійсним коефіцієнтом трансформації та може бути розрахована за формулою:

$$f_u = \frac{k_{un} - k_u}{k_u} \cdot 100\% \quad (9.33)$$

Кутова похибка, в свою чергу, зумовлена тим, що у реальних трансформаторах на відміну від ідеальних, вектор вторинної напруги повернутий відносно первинної не точно на 180° . Вона дорівнює куту між векторами первинної напруги та поверненим на 180° вектором вторинної напруги.

Струмова похибка впливає на точність вимірювання всіх вимірювальних приладів, що працюють із вимірювальним трансформатором струму, а кутова – тільки на точність фазочутливих приладів.

Значення обох похибок визначаються режимом роботи вимірювального трансформатора струму, а саме, від значення первинної напруги відносно номінальної, а також значення та характеру навантаження вторинного кола. Такі масштабні перетворювачі працюють при великих навантаженнях у режимі, що є близьким до режиму неробочого ходу, тому категорично заборонено закорочувати вторинну обвитку вимірювального трансформатора напруги, оскільки це може призвести до його руйнування.

Схема увімкнення вимірювального трансформатора напруги показана на рисунку 9.8.

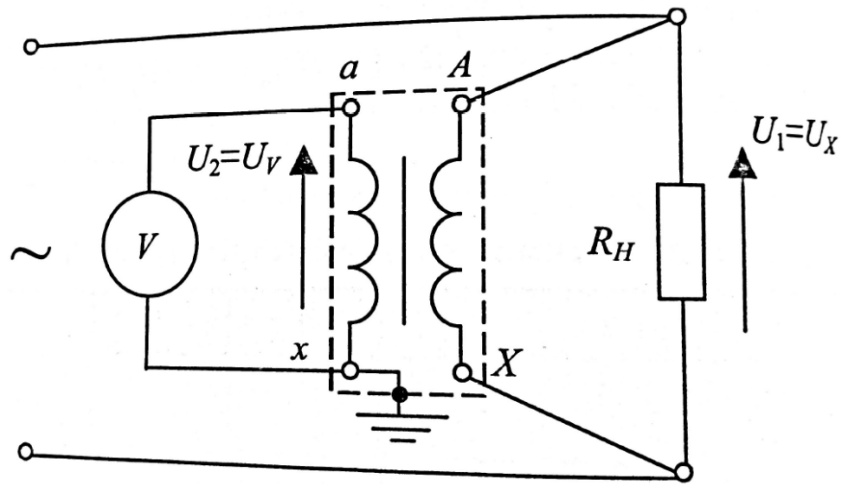


Рисунок 9.8 – Схема увімкнення вимірювального трансформатора напруги для вимірювання напруги

Первинну обвитку вимірювального трансформатора напруги під'єднують паралельно до споживача R_H , спад напруги U_x на якому вимірюється. До затискачів вторинної обвитки під'єднують вольтметр (коло напруги ватметра, лічильника електричної енергії, фазометра та ін.). Корпус цього масштабного перетворювача та затискач «х» вторинної обвитки обов'язково заземлюють.

Вимірювальні трансформатори напруги у вимірювальних колах використовують в разі, коли вимірювальна напруга вище за межі вимірювання використовуваного приладу. Значення вимірюваної напруги знаходять, виходячи із формули:

$$U_x = U_v k_{un}, \quad (9.34)$$

де U_v – показання амперметра;

k_{un} – номінальний коефіцієнт трансформації.

Вимірювальні підсилювачі

Вимірювальні підсилювачі – це підсилювачі електричних сигналів, таких як струм або напруга, з нормованими метрологічними характеристиками. Він призначений для створення вихідного сигналу, інформаційний параметр якого пропорційний до інформативного параметра вхідного сигналу, і використовується для виконання різноманітних операцій над аналоговими величинами такими, як, наприклад, підсилення вихідних сигналів первинних перетворювачів, перетворення сигналів, пропорційних до сили струму або електричного опору в напругу, перетворення різниці двох сигналів в напругу, узгодження вихідного опору джерела сигналу з навантаженням і т.п.

Вимірювальні підсилювачі будують на основі операційних підсилювачів з використанням резисторів, конденсаторів та напівпровідникових елементів (транзисторів та діодів). Операційними підсилювачами називають підсилювач постійного струму в інтегральному виконанні (інтегральна мікросхема) з великим коефіцієнтом підсилення за напругою (>10000).

На основі операційного підсилювача, підключаючи зовнішні елементи будують різні типи вимірювальних підсилювачів, схеми яких зображені на рисунку 9.9.

Основною статичною характеристикою вимірювальних підсилювачів є номінальний коефіцієнт перетворення, який можна визначити як відношення вихідного сигналу до вхідного. Враховуючи, що кожний вимірювальний підсилювач незалежно від призначення

перетворюють сигнали, що несуть вимірювальну інформацію, то до них ставляться дві основні вимоги:

- висока точність та стабільність;
- малий «дрейф нуля», під яким розуміють зміну вихідного сигналу за відсутності зміни вхідного сигналу, що викликана залежністю параметрів підсилювальних елементів вимірювальних підсилювачів від температури (температурний дрейф), їх зміною з плином часу (часовий дрейф) та нестабільністю напруги джерела живлення.

Основними джерелами похибок вимірювальних підсилювачів у статичному режимі є неідеальність їхніх параметрів та використаних зовнішніх елементів (резисторів, конденсаторів та напівпровідникових елементів), їх нестабільність у часі, різноманітні шуми та завади.

Систематичну складову похибки вимірювального підсилювача, в принципі, можна зменшити під час налагоджування його схеми в комплексі шляхом регулювання нульового рівня вихідного сигналу за відсутності сигналу на вході (таким чином зменшується адитивна складова похибки) та регулювання коефіцієнта перетворення (так зменшується мультиплікативна складова похибки). Одним із найрадикальніших методів зменшення похибок вимірювальних підсилювачів є введення зворотного зв'язку.

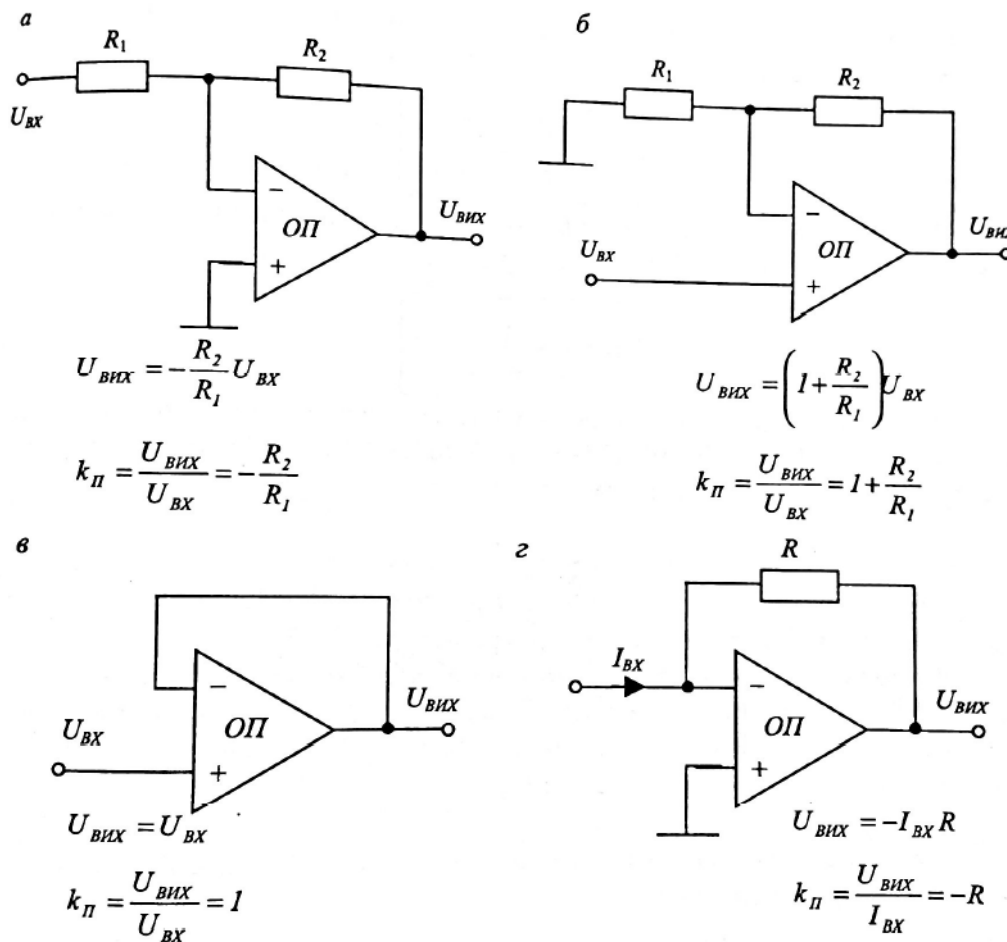


Рисунок 9.9 – Основні схеми вимірювальних підсилювачів: підсилювач напруги з інвертуванням фази вхідного сигналу (а); підсилювач напруги без інвертування фази вхідного сигналу (б); повторювач напруги (в); перетворювач струм-напруга (г); k_{Π} - коефіцієнт перетворення вимірювального підсилювача; ОП – операційний підсилювач

Розглянемо функціональні перетворювачі інформації, що побудовані на основі операційних підсилювачів. Це пристрої, які призначені для перетворення вимірювальних сигналів у відповідності до заданої функціональної залежності (функціонального перетворення інформації). Між інформативним параметром вихідного сигналу такого перетворювача є чітко встановлена функціональна залежність із інформативним параметром вхідного сигналу.

Широке розповсюдження в інформаційно-вимірювальній техніці здобули функціональні перетворювачі інформації, які виконують такі математичні операції, як, наприклад, підсумовування, віднімання, перемножування, ділення, диференціювання, інтегрування, логарифмування, піднесення до квадрата, здобуття квадратного кореня та ін..

На рисунку 9.10 зображені схеми деяких аналогових функціональних перетворювачів інформації, що реалізовані на операційних перетворювачах та показані їхні функції перетворення.

Вид функції перетворення того чи іншого функціонального перетворювача інформації визначається тим, які елементи ввімкнені в коло зворотного зв'язку і до входів операційного підсилювача. Внаслідок використання операційних підсилювачів аналогові функціональні перетворювачі інформації характеризуються винятково високою швидкістю у реальному масштабі часу.

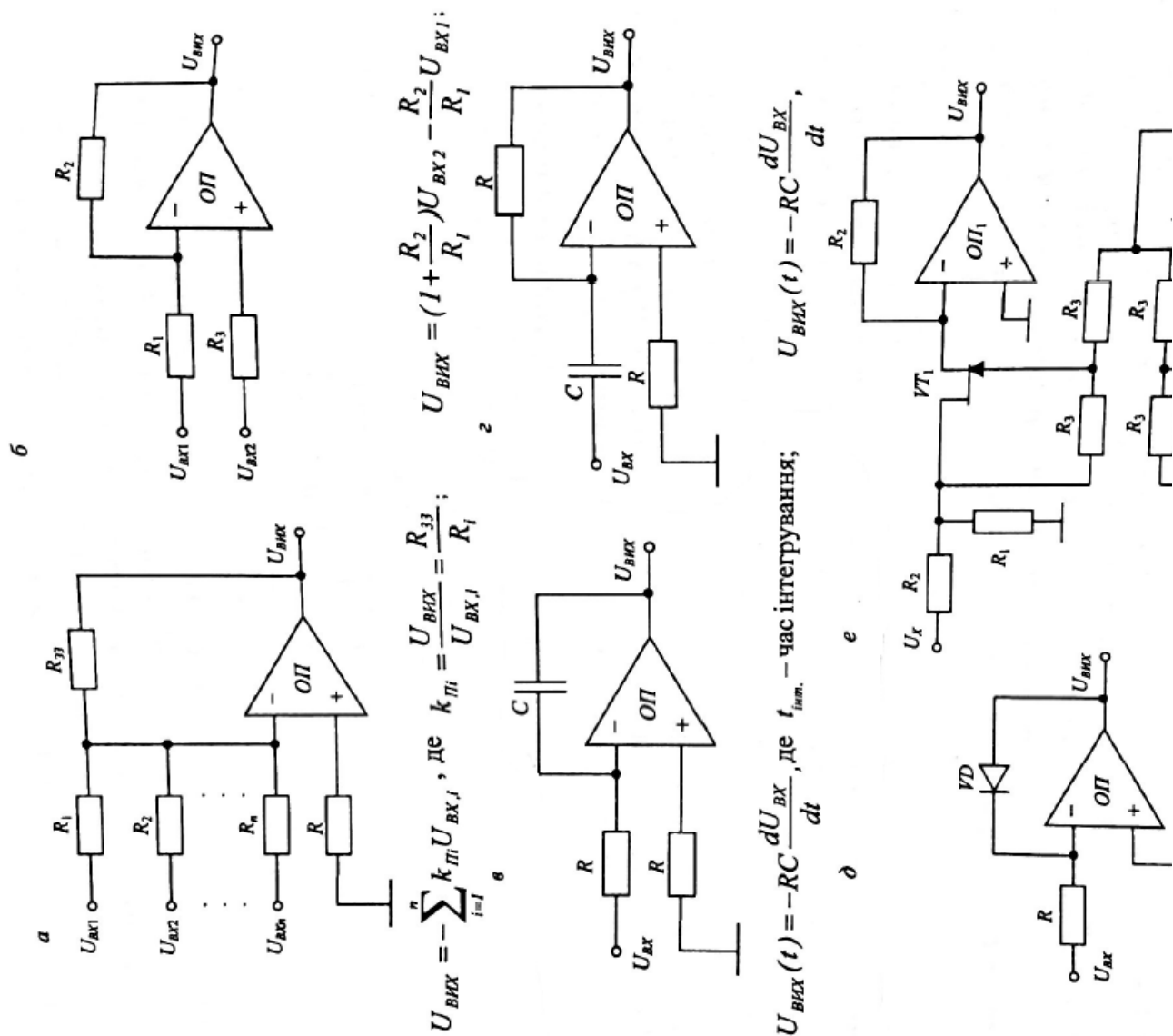
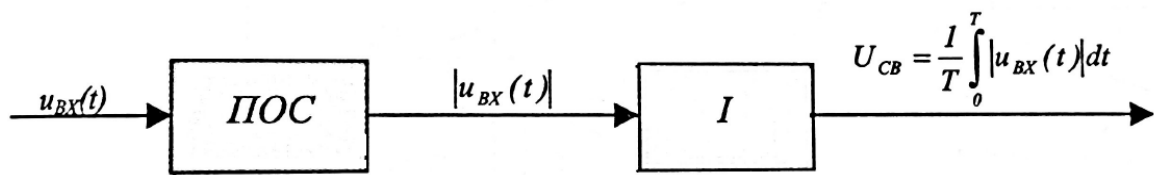


Рисунок 9.10 – схеми деяких аналогових функціональних перетворювачів інформації, реалізованих на операційних підсилювачах: суматор (а), субтрактор (б), інтегратор (в), диференціатор (г), логарифматор (д), перемножувач (е)

Перетворювачі середньовипрямлених значень електричних сигналів

Одними із найпоширеніших вимірювальних величин є середньовипрямлені, середньоквадратичні та амплітудні значення електричних сигналів. Для визначення середньо випрямленого значення змінного електричного сигналу необхідно спочатку перетворити двополярний сигнал в одно полярний з миттєвим значенням $|u_{вх}(t)|$, а потім його про інтегрувати для виділення сталої складової (рис. 9.11).



ПОС – перетворювач двополярного струму в однополярний; I – інтегратор

Рисунок 9.11 - Структурна схема перетворювача середньовипрямлених значень

Як видно з рисунку 9.11, в першу чергу виникає задача перетворення змінного двополярного сигналу в одно полярний, тобто його детектування (випрямлення). Для побудови перетворювачів двополярного сигналу в одно полярний (ПОС) застосовують напівпровідникові діоди, які мають випрямну властивість – здатність пропускати струм тільки в одному напрямку.

На рисунку 9.12 зображені схеми однопівперіодного (а) та двопівперіодного (б) пасивних випрямлячів, а також процеси ідеального (в) та реального (г) однопівперіодного випрямлення синусоїдного сигналу за допомогою напівпровідникового діода, тобто перетворення двополярного вхідного сигналу в одно полярний сигнал.

При ідеальному випрямленні (рисунк 9.20 в), вольт-амперна характеристика діода $i(u)$ являє собою пряму лінію, що виходить з початку координат. Через діод VD (рис. 12.7 а) проходить струм і тільки при додатних значеннях сигналу $u_{вх}(t)$ протягом часу $T/2$ (T – період синусоїдального сигналу).

Середньо випрямлена значення вихідного сигналу перетворювача в такому разі дорівнює:

$$U_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} |u_{BX}(t)| dt \quad (9.35)$$

При двоперіодному випрямленні (рис. 9.12 б) значення U_{CB} буде вдвічі більшим.

Однак, у реальних діодів вольт-амперна характеристика (рис. 9.12 г) є нелінійною і не виходить з початку координат, а має початкове зміщення – порогову напругу U_0 , і струм через діод починає протікати тільки при значеннях вхідного сигналу, що є більшими за U_0 , тобто протягом часу $\tau < T/2$. Наслідком цього є похибка перетворення, що проявляється у різниці випрямленого сигналу та його середньовипрямленого значення та їх дійсних значень. Це є

недоліком напівпровідникових діодів, який особливо проявляється при випрямленні малих сигналів, спів мірних із U_0 .

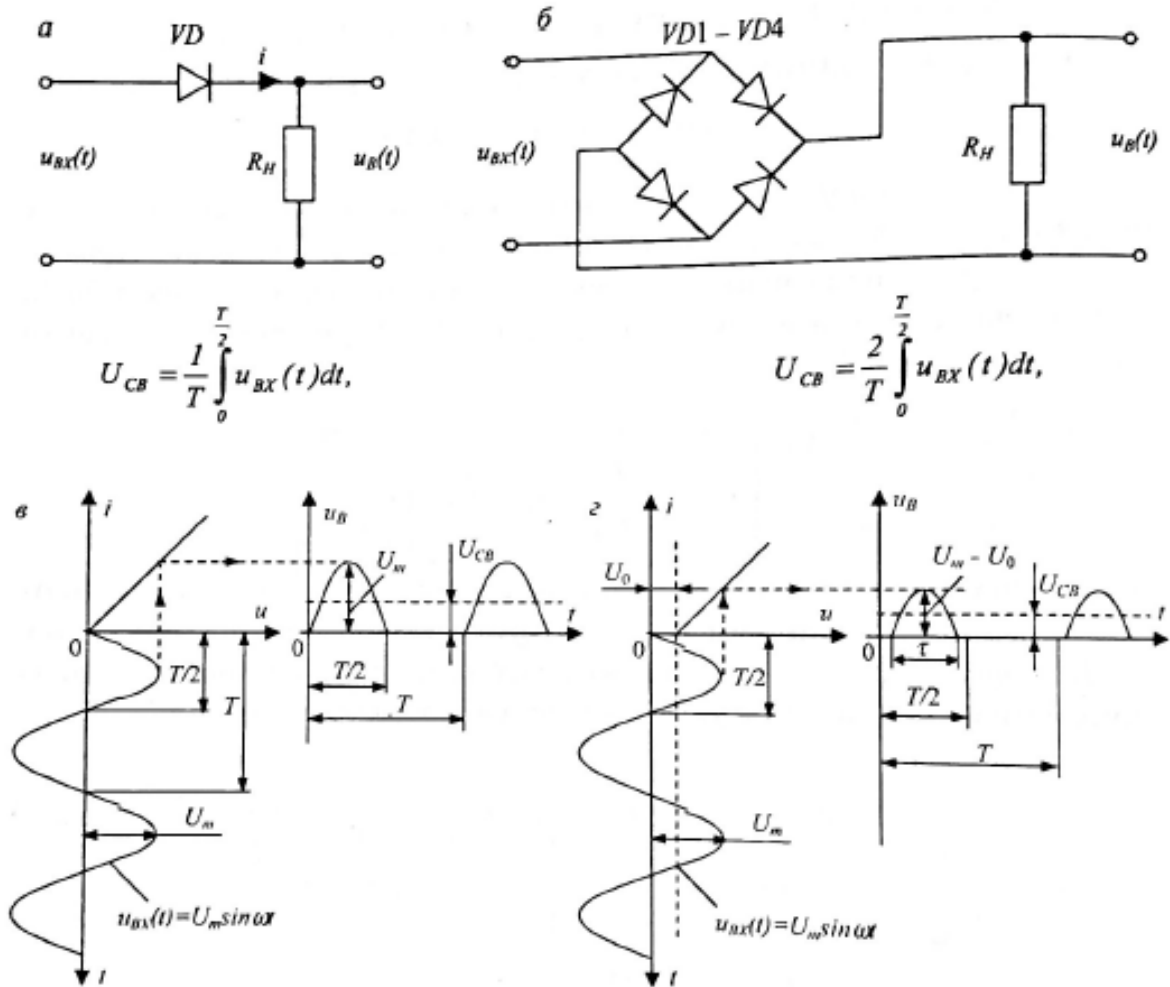


Рисунок 9.12 - Схеми однопівперіодного (а) та двопівперіодного (б) пасивних випрямлячів, а також процеси ідеального (в) та реального (г) однопівперіодного випрямлення синусоїдного сигналу за допомогою напівпровідникового діода

Значно зменшити похибку, що зумовлена пороговою напругою можна за допомогою так званих активних перетворювачів двополярного сигналу в одно полярний, що побудовані на основі операційних підсилювачів. На рисунку 9.13 наведена схема активного випрямляча, у якому діод увімкнений у коло від'ємного зворотного зв'язку операційного підсилювача в неінвертуючому увімкненні.

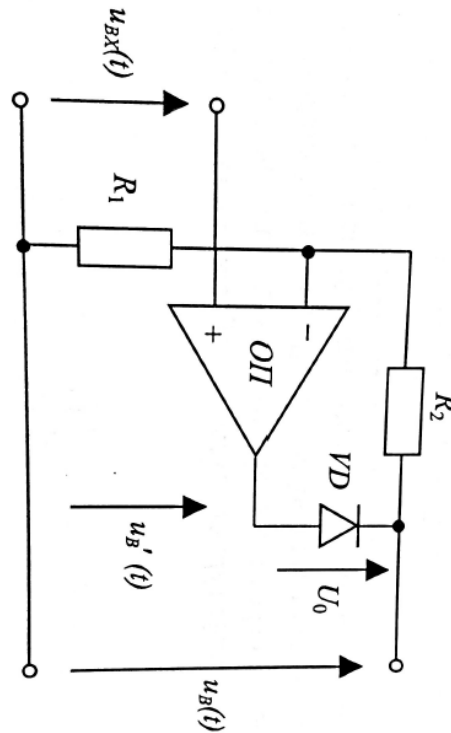


Рисунок 9.13 – Схема активного перетворювача двополярного сигналу в одно полярний

При дуже малих значеннях вхідного сигналу, коли $u'_{BX}(t) - u_B(t) \leq U_0$, діод VD закритий, від'ємний зворотній зв'язок перестає діяти і операційний підсилювач працює в режимі підсилення сигналів з власним коефіцієнтом підсилення, який становить десятки тисяч, що призводить до різкого збільшення напруги і відновлення вимоги $u'_{BX}(t) - u_B(t) > U_0$

Функція перетворення такого перетворювача двополярного сигналу в одно полярний в широкому діапазоні вхідних сигналів має вигляд:

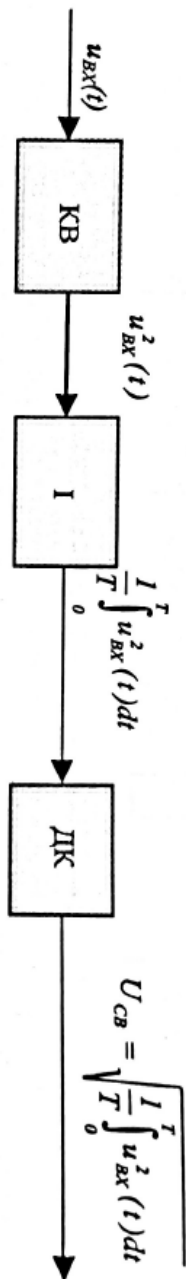
$$u_B(t) = k_n |u_{BX}(t)| \quad (9.36)$$

Порогова напруга в такому разі зменшується в k_n разів і становить одиниці мілівольт.

Описані вище пасивні та активні перетворювачі двополярного сигналу в одно полярний використовуються при побудові випрямних та електронних аналогових приладів для вимірювання середньовипрямлених значень електричних сигналів, інтегратором в яких служить вимірювальний механізм магнітоелектричної системи. Інтегратор одно полярного сигналу також може бути побудований на операційному підсилювачі.

Перетворювачі середньоквадратичних значень електричних сигналів

Для визначення середньоквадратичних або ефективних значень змінного електричного сигналу необхідно послідовно виконати три операції: піднесення сигналу до квадрату, інтегрування (усереднення) і добування кореня квадратного. Таки перетворювачі можуть бути побудовані за структурною схемою, що зображена на рисунку 15.1



КВ – квадратор; І – інтегратор; ДК – добувач кореня

Рисунок 9.14 – Структурна схема перетворення середньоквадратичних значень

Найскладнішим завданням при побудові перетворювачів середньоквадратичних значень електричних сигналів є піднесення вхідного сигналу до квадрату. Квадратори, що застосовуються в інформаційно-вимірювальних системах можна розділити на три групи:

- Квадратори з перетворенням миттєвих значень сигналу, в яких використовуються діоди та транзистори з природніми квадратичними ділянками вольт-амперних характеристик або кусково-лінійною апроксимацією параболічної залежності;
- Квадратори з проміжним перетворенням електричної енергії в теплову: термоелектричні, терморезистивні, термoeмнісні, фотоелектричні та ін..;
- Квадратори, що побудовані на функціональних перетворювачах: перемножувачах, функціональних перетворювачах з часоімпульсним перетворенням та ін..

Квадраторам, в яких використані елементи з природніми нелінійностями, властивий ряд недоліків, таких, як низька точність, великий розкид параметрів окремих елементів, вузький динамічний діапазон, у межах якого виконується вимога квадратичності. Проте, завдяки

простій схемі реалізації вони широко використовуються при побудові перетворювачів середньоквадратичних значень електричних сигналів невисокої точності.

Найбільш широке розповсюдження у вимірювальній техніці мають перетворювачі середньоквадратичних значень електричних сигналів, що побудовані на електротеплових перетворювачах. Вони безпосередньо реагують на середньоквадратичне значення змінного сигналу, зокрема при побудові аналогових електронних вимірювальних приладів середньоквадратичних значень широко використовуються термоелектричні перетворювачі (рис. 9.15).

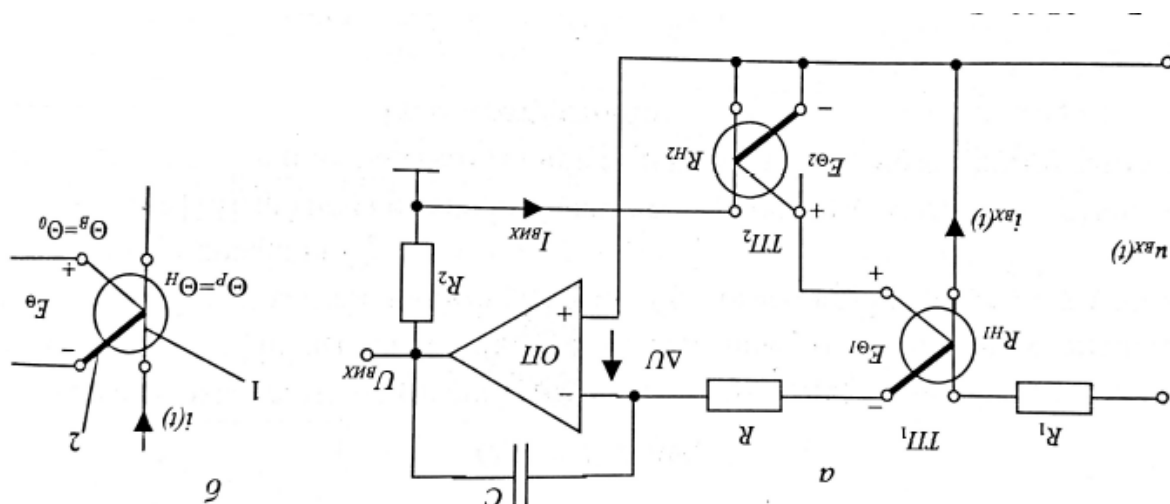


Рисунок 9.15 – Схема перетворювача середньоквадратичних значень (а), побудованого на термоелектричних перетворювачах (б)

Термоелектричний перетворювач складається з нагрівного елемента 1, який перетворює електричну енергію струму в теплову, та термопару 2, що перетворює температуру нагрівання елемента 1 в термоелектрорушійну силу. За умови, що температура робочого кінця термопару дорівнює температурі нагрівного елемента, а температура її вільних кінців дорівнює температурі довкілля, а також теплового балансу між нагрівним елементом та довкіллям, при якому кількість теплоти, що виділяється нагрівним елементом, дорівнює кількості теплоти, що виділяється у довкілля, маємо:

$$E_T = I^2 \frac{ER_H}{cS} = KI^2, \quad (9.37)$$

де I – середньоквадратичне значення струму;

R_H – опір нагрівального елемента;

E – питома ЕРС термопару;

c – коефіцієнт тепловіддачі;

S – площа поверхні нагрівного елемента, через яку відбувається теплообмін;

K – коефіцієнт перетворення термопару.

Із формули (9.37) видно, що термо-ЕРС термопару пропорційна до квадрата середньоквадратичного значення струму, який протікає нагрівним елементом термоперетворювача.

У вимірювальних приладах використовують контактні та безконтактні термоперетворювачі. У контактних термоперетворювачах робочий кінець термопару приварений до нагрівного елемента і має з ним електричний контакт, а в безконтактних – термопара та нагрівний елемент скріплені механічно за допомогою керамічної або скляної краплі і електричний контакт між ними відсутній.

В основу роботи перетворювача середньоквадратичних значень (рис. 9.15) покладений принцип взаємообернених перетворювань, за яким послідовно реалізуються функції, що показані на рисунку 9.14. Піднесення вхідного сигналу до квадрата здійснюється термоперетворювачем ТП₁. Інтегратор побудований на операційному підсилювачі ОП за RC-схемою. Для добування квадратного кореня в коло від'ємного зворотного зв'язку операційного підсилювача ввімкнений квадратор – другий термоперетворювач ТП₂.

До переваг термоперетворювачів можна віднести те, що вони безпосередньо реагують на середньоквадратичне значення вхідного сигналу, а також широкий частотний діапазон (від одиниць герців, до сотень мегагерців). Серед недоліків можна виділити нестабільність в часі та необхідність захисту від електричних та механічних перевантажень.

Перетворювачі амплітудних значень електричних сигналів

Амплітудне значення (амплітуд) змінних електричних сигналів визначають як максимальне значення за період T :

$$U_m = \max|u(t)|, t_i \leq t \leq (t_i + T), \quad (9.38)$$

У практиці вимірювань розрізняють амплітудні значення за позитивний U_m^+ і негативний U_m^- півперіоди електричного сигналу, а також розмаху сигналу $U_{mm} = U_m^+ + U_m^-$. Надалі будемо розглядати перетворювачі амплітудних значень, що призначені для перетворення періодичних симетричних відносно вісі часу електричних сигналів.

Перетворювачі використовуються для побудови електронних приладів для вимірювань амплітудних значень електричних сигналів. Існує багато способів перетворення амплітудного значення електричних сигналів, найпоширенішим з яких у вимірювальній техніці є пасивні перетворювачі амплітудних значень, в основу роботи яких покладений принцип запам'ятовувати максимального значення змінної напруги. Такі перетворювачі являють собою діодно-конденсаторні випрямні схеми з однопівперіодним випрямленням, які будують з відкритим (рисунок 9.16, а) та закритим входами (рисунок 9.16, б).

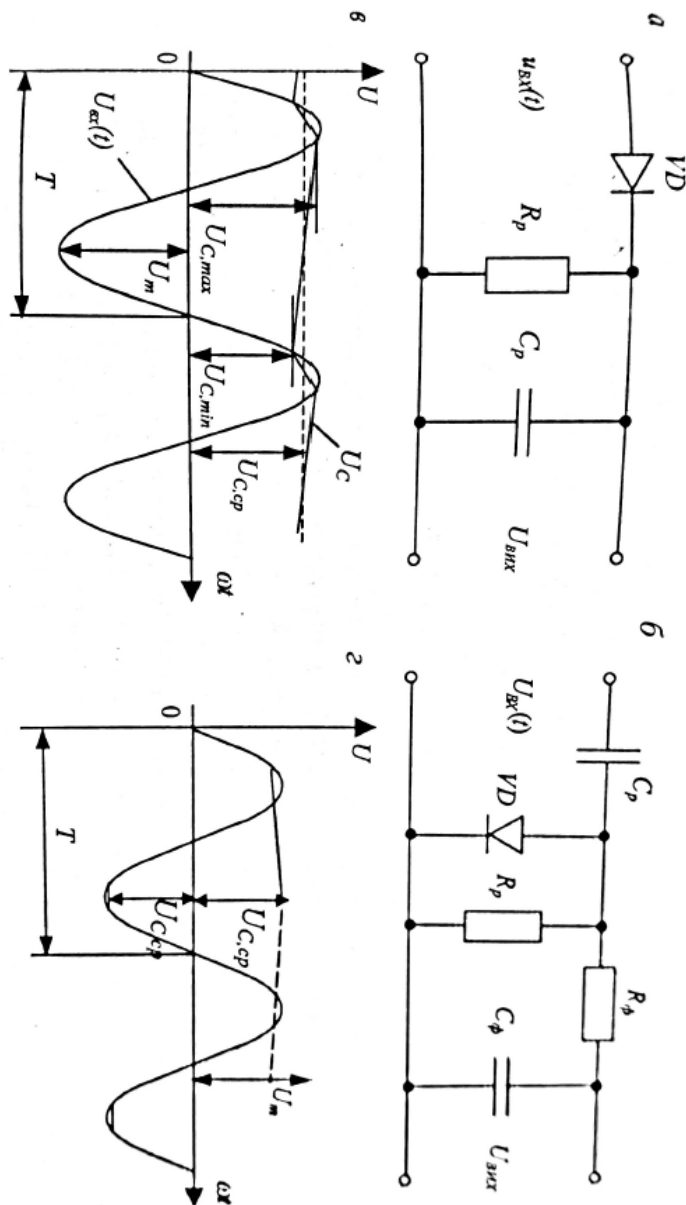


Рисунок 9.16 – Схеми пасивних перетворювачів амплітудних значень з відкритим (а) та закритим (б) входами та епюри напруги на ємності (в) та діоді (г)

Розглянемо роботу перетворювача із відкритим входом (рис. 9.16 а). У додатний на півперіод вхідного сигналу (рис. 9.16, в) діод VD відкритий і конденсатор C_p заряджається від вхідної напруги. Сталу часу заряду конденсатора обираються меншою від періоду T вхідного сигналу. Тому напруга на конденсаторі швидко досягає рівня $U_{сmax}$, який є близьким до амплітуди вхідного сигналу U_m .

У від'ємний напівперіод вхідного сигналу діод VD закритий і конденсатор C_p розряджається через резистор R_p . Сталу розряду конденсатора обирають набагато більшою за сталу часу заряду і періоду вхідного сигналу. Це забезпечується великим значенням опору розрядного конденсатора R_p . Внаслідок цього за від'ємний період вхідного сигналу конденсатор повільно розряджається до напруги, яка мало відрізняється від $U_{сmin}$. Тобто, напруга U_c на конденсаторі C_p є слабо пульсуючою і практично сталою, причому її середній рівень $U_{сср}$ мало відрізняється від амплітуди вхідного сигналу і є тим ближчий до, чим стала розряду більша від періоду вхідного сигналу.

Перетворювач амплітудних значень із закритим входом (рис. 9.16, б) відрізняється від перетворювачів амплітудних значень із відкритим входом тим, що в ньому вихідну напругу знімають не з конденсатора C_p , а з діода VD. Діод VD більшу частину періоду закритий, а

відкритий тільки упродовж короткого проміжку часу в момент зарядження конденсатора. Напруга на діоді (рис. 9.16, г) складається із суми напруги на конденсаторі і вхідної змінної напруги і являє собою пульсуючу напругу з амплітудою пульсації, близькою до суми амплітуд додатної і від'ємної півхвиль вхідного сигналу, і середнім значенням, яке дорівнює напрузі на конденсаторі.

Якщо в схемі перетворювача амплітудного значення і закритим входом виділити середнє значення напруги на діоді за допомогою фільтру нижчих частот $R\phi - C\phi$ (рис. 9.16, б), то напруга на виході перетворювача практично така сама, як і на виході схеми із відкритим входом, тобто дорівнює амплітудному значенню вхідного сигналу.

В випадку, коли вхідна напруга містить сталу складову U_0 , то напруга на конденсаторі, тобто на виході схеми із відкритим входом, дорівнює алгебраїчній сумі сталої складової та амплітудного значення додатної півхвилі змінної складової. Напруга на виході схеми із закритим входом незалежно від наявності сталої складової дорівнює амплітудному значенню додатної півхвилі змінної складової, тобто такий перетворювач відсікає сталу складову вхідного сигналу.

Пасивні перетворювачі амплітудних значень використовують здебільшого на вході вимірювальних приладів амплітудних (пікових) значень електричних сигналів, в яких випрямлення сигналу передуює його підсиленню. Для покращення метрологічних характеристик амплітудних перетворювачів, зокрема підвищення точності, зменшення порогу чутливості та розширення діапазону перетворення (вимірювання) в бік малих значень, збільшення вхідного опору тощо, застосовують активні перетворювачі амплітудних значень, побудовані на операційних підсилювачах.

Практичні завдання

1. Визначити опір шунта $R_{\text{ш}}$, що під'єднаний до міліамперметра касу точності 1,0 за струмом повного відхилення 300 мА та внутрішнім опором 0,25 Ом, якщо межа вимірювання побудованого амперметра 30А.
2. Амперметр з межею вимірювання 75 А побудований на основі мілівольтметрамагнітоелектричної системи класу точності 0,5 з максимальним відліком шкали 150, сталою шкали за напругою 0,1 мВ та внутрішнім опором 150 Ом, до якого під'єднали шунт. Визначити опір шунта.
3. До міліамперметра класом точності 0,2 та максимальним відліком шкали 150, сталою за струмом 1 мА та внутрішнім опором 100 Ом під'єднали шунт, опір якого 0,05 Ом. Розрахувати постійну шкали побудованого амперметра.
4. Розрахувати опір додаткового резистора, що під'єднаний до вольтметра з максимальним відліком шкали 100, сталою за напругою 0,5 В та внутрішнім опором 20 кОм, якщо межа вимірювання побудованого вольтметра 300 В.
5. Визначити опір додаткового резистора, що під'єднаний до вольтметра з межею вимірювання 60 В та власним споживанням потужності 0,9 Вт, якщо межа вимірювання побудованого вольтметра 600 В.
6. Вольтметр виготовлений на основі вимірювального механізму з внутрішнім опором 2000 Ом та додаткового резистора. Визначити опір додаткового резистора, якщо при вимірюванні напруги в 90 В вольтметр споживає потужність 0,27 Вт, а повне споживання потужності 0,75 Вт.
7. Амперметр з границею вимірювання 5 А увімкнений у коло споживача через вимірювальний трансформатор струму, у якого первинна обмотка містить 5 витків, а вторинна – 500 витків. Розрахувати первинний номінальний струм та показання амперметра, якщо струм, що протікає через споживача – 300 А. навести схем вимірювання.
8. Визначити необхідний номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму И510 (див. табл. 27.12 [2]), що використовується разом з вольтметром електродинамічної системи з межею вимірювання 150 В для

- вимірювання напруги. Орієнтоване значення якої 7000 В. Навести схему вимірювання.
9. Визначити номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатору струму та очікуване показання амперметра з межею вимірювання 5 А, які використовуються при вимірюванні сили струму. орієнтоване значення якого 63 А. Навести схему вимірювання.
 10. Амперметр електромагнітної системи з межею вимірювання 5 А, максимальним відліком 100 увімкнений в коло однофазного споживача змінного струму з номінальним коефіцієнтом трансформації 100А/5А. Розрахувати силу струму в колі споживача, якщо отримали відлік за шкалою амперметра 70. Навести схему вимірювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В.М. Ванько, Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук; за ред. проф. Є.С. Поліщука та проф. В.М. Ванька. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584 с.
2. Оборський Г. О. та ін. Вимірювання фізичних величин: Навчальний посібник / Г.О. Оборський; П. Т. Слободяник; В. Л. Костенко; С. Г. Антошук / За ред., проф. Г.О. Оборського. – Одеса: «Астропринт», 2012 – с.
3. Дорожовець М. та ін. Основи вимірювальної техніки: Підручник: У2 т. / М. Дорожовець. В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек. А. Ковальчик; за ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2005. – Т.1. Основи метрології. – 532 с.
4. Захожай В.Б., Чорний А.Ю. Статистичне забезпечення управління якістю: Навчальний посібник. – Київ: Центр навчальної літератури, 2005. – 340 с.

Навчальне видання

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Методичні вказівки для виконання практичних робіт
для студентів спеціальності 175очної форми навчання

Автори: Голофєєва Марина Олександрівна
Левинський Олександр Сергійович