МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Касаткіна І.В., Бойко С.М., Жуков О.А.

ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Навчальний посібник

Кривий Ріг
2022

УДК 621.31

Рекомендовано до друку вченою радою Криворізького національного університету 31 травня 2022р. (протокол № 3)

Рецензенти:

Жуйков В.Я., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ)

Чорний О.П., доктор техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (м. Кременчук)

І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков

Т 38 Вимірювальні системи сучасних електромеханічних комплексів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков – Кривий Ріг, 2022. – 161 с.

ISBN …

У навчальному посібнику викладено основні питання та загальнотеоретичні відомості щодо вимірювальних систем сучасних електромеханічних комплексів. Значний обсяг матеріалу присвячено датчикам, що використовуються у вимірювальних системах електромеханічних комплексів на промислових підприємствах.

Навчальний посібник є логічним продовженням ряду навчальних посібників авторів та містить їх нові наукові розробки.

Рекомендовано для фахівців, аспірантів та студентів за напрямком 141 – «Енергетика, електротехніка та електромеханіка» та інших споріднених спеціальностей при вивченні дисциплін «Способи поліпшення якості електроенергіїї в мережах живлення», «Вимірювальні системи сучасних електромеханічних комплексів», «Системи автоматичного керування» та інших.

ЗМІСТ

ВСТУП…… 5

Розділ 1 Smart Grid технології та вимірювальні системи електромеханічних комплексів…… 6

1.1 Сучасні аспекти електромеханічних технологій…….. 6

1.2 Вимірювальні системи електромеханічних комплексів……... 11

1.3 Місце вимірювальних системи у сучасних енергетичних комплесах 16

Контрольні питання до розділу 1……. 20

Розділ 2 Загальні відомості про датчики…… 21

2.1 Загальна інформація……. 21

2.2 Класифікація датчиків…….. 23

2.3 Принцип дії вимірювальних приладів різних систем…… 33

Контрольні питання до розділу 2…….. 46

Розділ 3 Основні положення та визначення перетворюючих пристроїв приладів…… 47

3.1. Загальні положення та визначення……. 47

3.2 Область застосування потенціометричних перетворювачів……. 49

3.3 Основні елементи конструкції перетворювачів ……..... 49

3.4 Основні вимоги, що ставляться до перетворювачів ……. 51

3.5 Класифікація перетворювальних пристроїв приладів…… 54

3.6 Загальні положення про похибки перетворювачів …… 55

Контрольні питання до розділу 3…….. 57

Розділ 4 Датчики вимірювальних систем сучасних електромеханічних комплексів…….. 58

4.1. Датчики струму та напруги……. 58

4.2 Датчики швидкості…… 64

4.3 Датчики лінійних і кутових переміщень……. 87
4.4 Датчики маси, тиску, вологи…… 95
4.5 Датчики оптичні та відео…….. 118
4.6 Датчики рівня……. 125
4.7 Датчики температури…… 141
4.8 Датчики положення……... 152
Контрольні питання до розділу 4…….. 153

Список використаної та рекомендованої для користування літератури……..... 157

Вступ

В даний час, практично будь-який виробничий механізм приводиться в дію системою автоматизованого електроприводу, основним елементом якого є електричний двигун. За допомогою відповідних перетворювальних і керуючих пристроїв формуються необхідні статичні і динамічні характеристики виконавчих органів робочої машини.

Електромеханічна система, що складається з електродвигуного, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв, призначена для приведення в рух і управління виконавчим органом робочої машини називається електричним приводом.

Мова йде не тільки про повідомлення робочого органу обертального або поступального руху, але, головним чином, про забезпечення за допомогою автоматизованого електроприводу оптимального режиму роботи, при якому досягається найбільша продуктивність при необхідної точності.

Характер руху робочих механізмів (виконавчих органів) може бути найрізноманітнішим – обертальним, поступальним (односпрямованим і реверсивним), а також зворотно-поступальним. У деяких випадках переміщення робочого органу має відбуватися відразу в декількох площинах - антени радіотелескопа, маніпулятор робота, ківш екскаватора.

Багато машин і механізмів при своїй роботі вимагають зміни як напряму, так і швидкості руху виконавчих органів. Так кутова швидкість валків прокатного стана повинна бути різною в залежності від профілю прокатуваного металу. Для більшості підйомно-транспортних машин – кранів, ліфтів, підйомників – для забезпечення точної зупинки їх швидкість повинна бути попередньо знижена.

Тому значну роль у побудові систем автоматичного керування електромеханічними комплексами відіграють вимірювальні системи, до складу яких входять різні типи датчиків та перетворювачі.

Розділ 1 Smart Grid технології та вимірювальні системи електромеханічних комплексів

1.1 Сучасні аспекти електромеханічних технологій

Нові умови та каталізатори розвитку галузі формують потребу у розробці та впровадженні нових технологій та елементів, що забезпечують:

- рух потоків електроенергії та інформації від енергетичних компаній до споживачів;

- постійний контроль над усіма елементами мережі – від роботи електростанцій до споживання електроенергії індивідуальними пристроями;

- інтеграцію розподілених джерел електроенергії (у тому числі поновлюваних) та засобів зберігання електроенергії;

- рекуперацію тепла.

Таким чином, основні фактори, що визначають необхідність кардинальних перетворень в електроенергетиці під впливом умов, що складаються, можна згрупувати наступним чином [1].

Чинники технологічного прогресу:

- поява та розвиток нових технологій, пристроїв та матеріалів (у тому числі в інших галузях), що потенційно застосовуються у сфері електроенергетичного виробництва, і в першу чергу наростаючі темпи та масштаби розвитку комп'ютерних та інформаційних технологій;

- інтенсивне зростання кількості малих генеруючих (насамперед відновлюваних) джерел енергії у світі;

- загальна тенденція підвищення рівня автоматизації процесів.

Чинники підвищення вимог споживачів:

- підвищення вимог до набору та якості послуг;

- очікування на зниження цінових параметрів послуг галузі;

- вимоги до інформаційної прозорості системи взаємовідносин суб'єктів електроенергетичних ринків, насамперед із споживачами.

Чинники зниження надійності:

- наростаючий рівень зносу обладнання;

- необхідність масових інвестицій у реновацію основних фондів;

- зниження загального рівня надійності електропостачання;

- високий рівень втрат при перетворенні, передачі та розподілі електроенергії.

Чинники зміни ринку:

- зміна внутрішніх умов функціонування електроенергетичних ринків;

- економічна нестабільність;

- реформування організації функціонування електроенергетики у більшості країн;

- розвиток ринку квот на екологічно небезпечні викиди;

- тривалий інвестиційний та життєвий цикл активів та галузі в цілому, що становлять від 15 до 40 років.

Фактори підвищення вимог у сфері енергоефективності та екологічної безпеки [1]:

- необхідність зниження впливу на довкілля;

- необхідність підвищення енергоефективності та енергозбереження.

Ідентифікація цих умов і факторів висунула на передній план проблему розвитку електроенергетики в рамках традиційних підходів та існуючих принципів і способів, включаючи технологічний базис.

Проведений за кордоном аналіз можливих шляхів показав, що розвиток електроенергетики в рамках колишньої екстенсивної концепції, заснованої переважно на введенні нових потужностей та розвитку мережевої інфраструктури з покращенням техніко-економічних показників окремих видів обладнання та технологій, пов'язаний з наявністю серйозних обмежень.

Як найбільш значущі при цьому можна виділити:

- можливість подальшого нарощування обсягів, підвищення ефективності генеруючих компаній, у тому числі через вичерпність невідновлюваних енергоресурсів, появи суттєвих екологічних обмежень у довгостроковій перспективі;

- стримування розвитку мережевої інфраструктури, насамперед у районах з високою щільністю населення, дедалі більше зростаючими техногенними та інфраструктурними ризиками розвитку;

- низький потенціал підвищення ефективності використання ресурсів (існуюча технологічна база електроенергетики практично вичерпала можливості значного підвищення продуктивності обладнання);

- обмеженість інвестиційних ресурсів для будівництва нових енергетичних об'єктів та розвитку мережевої інфраструктури.

Результати досліджень за кордоном показали, що облік усіх факторів і пов'язаних з ними ризиків розвитку електроенергетики в майбутньому вимагає перегляду традиційних підходів, принципів і механізмів її функціонування, вироблення нових, здатних забезпечити сталий розвиток, проривне підвищення споживчих властивостей та ефективності використання енергії [2].

Це рішення стимулювало розробку нової концепції інноваційного розвитку електроенергетики, яка, з одного боку, відповідала б сучасним поглядам, цілям і цінностям соціального та суспільного розвитку, що формуються та очікуваним потребам людей та суспільства в цілому, а з іншого – максимально враховувала основні тенденції та напрями науковотехнічного прогресу в усіх галузях, сферах життя та діяльності суспільства. Такою концепцією і стала Smart Grid.

Основними ідеологами розробки цієї концепції виступили США та країни ЄС, які прийняли її за основу своєї національної політики енергетичного та інноваційного розвитку. У подальшому, як зазначалося, концепція Smart Grid отримала визнання та розвитку практично переважають у всіх великих індустріально розвинених країн.

Проведений аналіз дозволив сформулювати наступні вихідні положення, прийняті під час розробки та розвитку концепції Smart Grid [3].

1. Концепція Smart Grid передбачає системне перетворення електроенергетики (енергосистеми) і зачіпає всі її основні елементи:

генерацію, передачу та розподіл (включаючи і комунальну сферу), збут та диспетчеризацію.

2. Енергетична система в майбутньому розглядається як подібна до мережі Інтернет інфраструктура, призначена для підтримки енергетичних, інформаційних, економічних та фінансових взаємин між усіма суб'єктами енергетичного ринку та іншими зацікавленими сторонами.

3. Розвиток та функціонування енергетичної системи мають бути спрямовані на задоволення узгодженими всіма зацікавленими сторонами основних вимог – ключових цінностей, вироблених у результаті спільного бачення всіма зацікавленими сторонами цілей та шляхів розвитку електроенергетики.

4. Довгострокове перетворення електроенергетики має бути спрямоване на розвиток існуючих та створення нових функціональних властивостей енергосистеми та її елементів, які забезпечують найбільше досягнення цих ключових цінностей.

5. Електрична мережа (всі її елементи) розглядається як основний об'єкт формування нового технологічного бази¬су, що дає можливість суттєвого поліпшення досягнутих та створення нових функціональних властивостей енергосистеми.

6. Розробка концепції комплексно охоплює всі основні напрями розвитку: від досліджень до практичного застосування та тиражування - і зачіпає наукову, нормативно-правову, технологічну, технічну, організаційну, управлінську та інформаційну сфери.

7. Реалізація концепції носить інноваційний характері і відображає перехід до нового технологічного укладу в електроенергетиці та економіці в цілому.

Методологія розробки концепції Smart Grid заснована на підходах, що розвиваються в сучасній теорії стратегічного управління, де базовим елементом є визначення стратегічного бачення розвитку, що є системою поглядів на прогнозований стан об'єкта в майбутньому, тобто на роль і місце

електроенергетики в сучасному суспільстві та «суспільстві майбутнього». Таке бачення визначає цілі та вимоги до розвитку галузі, підходи, принципи та способи їх досягнення, необхідний технологічний базис [4].

Реалізація вищевикладених ключових вимог (цінностей) у концепції Smart Grid ґрунтується на сформульованих авторами наступних базових підходах.

1. Орієнтація на вимоги зацікавлених сторін та клієнтоорієнтованість. Вироблення та прийняття рішень щодо розвитку та функціонування електроенергетики здійснюється, як уже зазначалося, на основі балансу вимог усіх зацікавлених сторін з урахуванням очікуваних ними вигод та витрат, де споживачеві відведено ключову роль активного учасника та суб'єкта.

Таким чином, концепція Smart Grid передбачає перехід до активного споживача. По суті, споживач стає, з одного боку, активним суб'єктом вироблення та прийняття рішень щодо розвитку та функціонування енергосистеми, а з іншого – об'єктом управління, що забезпечує поряд з іншими реалізацію ключових вимог.

2. Зростання ролі управління як основного фактора розвитку та способу забезпечення формованих вимог (цінностей) з відповідним різким підвищенням керованості як окремих елементів, так і енергосистеми в цілому.

Саме зростання ролі управління розглядається як альтернатива забезпеченню вимог і функцій в електроенергетиці за рахунок нарощування потужностей та зв'язків (мереж), розвитку не стільки через поліпшення їх традиційних фізичних, енергетичних і технологічних характеристик, скільки шляхом широкої (глибокої) адаптації, використання та впровадження в електроенергетиці рішень та інновацій, у тому числі з інших галузей, насамперед інформаційно-комунікаційних та комп'ютерних технологій.

3. Інформація постає як головний засіб забезпечення ефективного управління. При цьому є принципово важливим підкреслити, що

управлінські та інформаційні зв'язки перетворюються на системоутворюючий фактор, що забезпечує перехід до нової якості: від енергетичної до енергоінформаційної системи. Енергоінформаційна інфраструктура є базою для комплексного управління всією енергетичною системою на базі концепції Smart Grid, включаючи технологічну інтеграцію електричних та інформаційних мереж.

До структури сучасної автоматизованої електромеханічної системи входять [4]:

– програмний пристрій;

– датчики електричних і механічних параметрів;

– механічна частина електропривода;

– система керування технологічним процесом;

– система керування електроприводом;

– електрична силова частина електропривода;

– робочий орган машини;

– технологічний процес;

– датчики технологічних параметрів.

1.2 Вимірювальні системи електромеханічних комплексів

Вимірювальні прилади та пристрої, технології зчитування та вимірювання є однією з ключових технологічних областей та важливим компонентом сучасної енергетичної системи на базі концепції Smart Grid. Ці технології виконуватимуть такі функції [1]:

- оцінювати стан обладнання та рівень інтегрованості мережі, що відображає ступінь зосередження інформації в єдиному центрі;

- забезпечувати безперервний моніторинг даних, мінімізувати помилки при виставленні рахунків;

- сприяти оптимізації режимів мережі та скорочення викидів забруднюючих речовин за рахунок надання споживачеві можливості регулювати попит;

- підтримувати більш комплексні вимірювання та забезпечувати безперервний моніторинг даних;

- сприяти прямій взаємодії між постачальником послуг та споживачем.

Передбачається, що ці елементи дозволять забезпечити вирішення наступного спектра завдань [5].

1. На рівні клієнта сучасні мережі не матимуть електромеханічних лічильників та вимірювальних приладів. Натомість будуть встановлені сучасні цифрові вимірювальні прилади та пристрої, пов'язані як зі споживачем, так і з постачальником послуг. Сучасні мікропроцесорні вимірювальні прилади здійснюватимуть широкий спектр функцій, у тому числі фіксуватимуть витрати протягом усього процесу виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Більшість клієнтів також зможуть реєструвати інформацію про можливі критичні сигнали, наприклад, пік цін, що надається енергопостачальною організацією. Також вимірювальні пристрої повідомлятимуть клієнта про проходження критичного рівня завантаження мережі.

Удосконалені вимірювальні пристрої здійснюватимуть функції контролю над бажаним рівнем витрати електроенергії, графік якого програмується клієнтом. Залежно від змін цін на електроенергію пристрою автоматично контролюватимуть навантаження клієнта відповідно до цього графіка.

Крім того, вимірювальні пристрої повинні забезпечувати розширення наданого переліку комунальних послуг, таких як пожежна та охоронна сигналізація та ін. підключення (бездротові, BPL і навіть оптоволоконна мережа в будинках). Інтеграція їх із системами безпеки забезпечить запобігання зламам та порушенням.

2. На рівні комунальних підприємств удосконалені технології зчитування та вимірювань розширять спектр інформації, що надається операторам і диспетчерам енергетичної системи, яка включатиме, наприклад:

- значення коефіцієнта потужності;

- параметри якості електроенергії в межах усієї системи;

- WAMS (Wide Area Measurement System, англ) - розподілена система вимірювань;

- характеристику стану устаткування;

- маніпуляції з вимірами та даними датчиків;

- відомості про природні катаклізми;

- визначення місць пошкоджень;

- навантаження трансформаторів та ліній;

- профілі напруги мережі;

- температуру критичних елементів;

- ідентифікацію відмов;

- профілі та прогнози споживання електроенергії.

Нові системи програмного забезпечення повинні збирати, зберігати, аналізувати та обробляти велику кількість даних, що проходять через сучасні інструменти вимірювання та зчитування. Опрацьовані дані потім будуть передані у існуючі та нові інформаційні системи обслуговуючих компаній, що виконують безліч найважливіших функцій бізнесу (білінг, планування, експлуатація, робота з клієнтами, прогнозування, статистичні дослідження тощо).

Майбутні цифрові реле, які використовують інтелектуальні агенти, значно підвищать надійність енергетичної системи. Широкі схеми моніторингу, захисту та контролю інтегруватимуть цифрові реле, «удосконалений» зв'язок та інтелектуальних агентів. У такій інтегрованій розподіленій системі захисту реле будуть здатні автономно взаємодіяти один з одним. Така гнучкість та автономність підвищує надійність, оскільки навіть при збоях на якійсь ділянці мережі решта реле на базі агентів продовжує захищати енергетичну систему.

Прогнозовані масштаби впроваджень розглянутих технологій досить великі. Глобальна трансформація технологій вимірювання та зчитування використовуватиме безліч інтелектуальних, взаємодіючих вимірювальних

приладів. Але, як показує закон Мура, ціни на чіпи стануть падати, навіть якщо їхня обчислювальна потужність зростатиме. До того ж, як показує історія, вимоги, пов'язані з всеосяжним, надійним і недорогим зв'язком, стануть помітно доступнішими, оскільки революція в цифровому зв'язку все ще триває [4, 5].

Існує безліч переваг від розвитку таких технологій у галузі вимірювання. Деякі з найважливіших перераховані нижче.

Вигоди для споживачів:

- можливість приймати обґрунтовані рішення щодо управління навантаженням;

- прямий зв'язок з ринком електроенергії в режимі реального часу;

- мотивація до участі у функціонуванні ринку;

- зниження витрат на електроенергію.

Вигоди для енергопостачальних компаній:

- контроль коливань навантаження;

- зниження експлуатаційних витрат;

- "підтримка" при перевантаженнях;

- Зниження крадіжок електроенергії.

Удосконалені датчики та нові методи та засоби вимірювання збиратимуть необхідну інформацію про стан енергетичної системи та всіх її елементів. Інтелектуальні системи обробки інформації потім будуть аналізувати в режимі реального часу умови функціонування, а також, у разі потреби, ініціювати необхідні дії.

Переваги вдосконалення процесу збирання даних:

- більш ефективне використання та технічне обслуговування активів;

- постійний моніторинг та оцінка стану експлуатованого обладнання, його залишкового терміну служби;

- виявлення та запобігання потенційним збоям і оперативна оцінка та усунення виникаючих проблем;

- своєчасна передача операторам інформації про передаварійний стан.

Контрольно-вимірювальна апаратура

Розширений моніторинг, контроль і система захисту, а також DR-інструменти (demand response «управління попитом») є невід'ємною частиною надійної мережі, що самовідновлюється. Далі наведено деякі переваги, які будуть реалізовані в енергетичній системі на базі концепції Smart Grid [5]:

- скорочення каскадних відключень;

- запобігання аварійному виходу з ладу обладнання, що швидко розвивається;

- контроль пошкодження, що повільно розвивається;

- оптимальне використання існуючих активів;

- зниження перевантажень;

- ефективніші програми технічного обслуговування активів;

- зменшення кількості відмов обладнання та зниження витрат на ліквідацію аварій;

- мінімізація негативного впливу на довкілля;

- максимальне використання найбільш ефективних генеруючих пристроїв;

- зниження втрат під час постачання електроенергії.

Інформація від інтелектуальних вимірювальних приладів вимірювання може передаватися за допомогою:

- загальнодоступного бездротового зв'язку, принцип роботи якого схожий на бездротовий Інтернет;

- радіозв'язку, з використанням спеціальних частот, надійніших, ніж у випадку загальнодоступного бездротового зв'язку;

- широкосмугових електричних ліній;

- електричних мереж із встановленими на обох кінцях ліній модемами, які дозволять обмінюватися інформацією між споживачами та генеруючими компаніями.

Впровадження інформаційних технологій передбачає удосконалення

комунальних IT-технологій для створення сервісно-орієнтованої інфраструктури (Service Oriented Infrastructure, SOA, англ) за допомогою використання загальної інформаційної моделі та загального двостороннього каналу для передачі інформації. Загальна інформаційна модель (Common Information Model, англ) – міжнародний стандарт, що забезпечує єдину модель інформаційного обміну, яка охоплює проміжок від лічильника споживача до системи транспортування електроенергії [6].

Інформаційні системи не можуть виконувати нові функції, потрібні програмам Smart Grid, тому вдосконалення існуючих технологій має проходити разом із впровадженням нових пристроїв та компонентів.

1.3 Місце вимірювальних системи у сучасних енергетичних комплесах

Датчики є найважливішим компонентом інфраструктури Smart Grid. Інтелектуальна енергомережа повинна адаптуватися до змін та автоматично усувати проблеми. В обох випадках потрібні відповідні датчики. Датчики встановлюються різних ділянках енергомережі, зокрема лініях електропередач, розподільних пристроях. В енергомережах Smart Grid датчики служать для підвищення коефіцієнту користої дії (ККД), відстеження роботи мереж, балансування навантаження та управління двостороннім потоком розподілу потужності [7].

Специфічні вимоги енергомереж Smart Grid передбачають використання цілого ряду інтелектуальних датчиків, таких як аналізатори розчиненого природного газу, двофазні датчики, датчики напруги, датчики розподілу навантаження в електромережах, а також датчики динамічної оцінки стану лінії електропередач, що дозволяють збільшити потік, що передається. В інтелектуальних електромережах застосовується понад 27 типів датчиків, найбільш поширеними є інтелектуальні лічильники електроенергії (з бездротовою передачею даних), далі йдуть датчики стану ліній електропередач, а також датчики рівня сигналу бездротових

підключень.

Smart Grid – це еволюційний, а не революційний розвиток комунікацій. Щоб зрозуміти, які зміни пропонує нам нова технологія, необхідно розглянути основні параметри існуючих мереж. Традиційним енергосистемам вже майже 125 років і в їх роботі можна виділити кілька основних етапів [8]:

1. Виробництво. створення електронів, головного компонента електрики.

2. Передача. Передача електроенергії високовольтними лініями електропередач.

3. Розподіл. На даному етапі локальні трансформатори знижують напругу до споживчих 220 або 110 В.

4. Збут. Контролює загальний обсяг енергоспоживання для конкретного домогосподарства. Облік ведеться з допомогою домашніх лічильників. За результатами моніторингу комунальні компанії виписують рахунки абонентам.

5. Споживання. Використання наведеної у відповідний формат енергії кінцевим споживачем. Smart grid вносить зміни до деяких, або у всі етапи даної екосистеми. Деякі зміни сфокусовані більше на роботу комунальних компаній, а деякі, навпаки, адресовані переважно споживачам.

Загалом Smart grid надає значно більше актуальної інформації з енергоспоживання для користувачів і дозволяє комунальним компаніям вести моніторинг усіх процесів у режимі реального часу. Новаторство стало можливим завдяки інтелектуальним лічильникам, що обробляє та відсилає дані кожні кілька годин. Таким чином, за допомогою Smart grid планується підвищити загальну енергоефективність, збалансувати навантаження на інфраструктуру та запропонувати абонентам вигідніші та гнучкіші тарифи.

Розгортання Smart grid вже розпочалося у багатьох країнах світу. Серед регіонів із найбільш помітним проникненням інтелектуальних мереж можна відзначити:

Торонто (Канада). Онтаріо стала першою провінцією в Канаді, яка застосувала новий підхід до ціноутворення тарифів на комунальні послуги. Ціни задаються з урахуванням поточного навантаження та змінюються протягом дня. Таким чином, перевантаження пікового енергоспоживання частково розподіляються за іншими часовими відрізками. Все це стало доступним завдяки повній модернізації інфраструктури інтелектуальними лічильниками.

Техас (США). Майже 100% модернізація інфраструктури інтелектуальними лічильниками. Автоматизовані системи та спеціальне програмне забезпечення дозволяє абонентам стежити за своїм енергоспоживанням прямо на вебсайтах комунальних компаній.

Скандинавія. Один із найуспішніших прикладів впровадження Smart grid – повне проникнення технології у Швеції та Фінляндії. Модернізовано всю інфраструктуру, інтелектуальні лічильники стоять у кожному будинку.

У той час як США найбільш інтенсивно фінансують розробки технологій Smart Grid та варіанти їхньої ринкової реалізації, інші країни (Австралія, Нова Зеландія, Німеччина, Іспанія, Великобританія, Франція та ін.) докладають серйозних зусиль щодо реалізації цих програм. У той час як Японія та Південна Корея вкладають вже досить серйозні суми у розвиток Smart Grid, Китай лише планує свої кроки у цій галузі, готуючись стати найбільшим інвестором. Азія і Латинська Америка вважаються ринками, що найбільш швидко розвиваються. Наприклад, використання інтелектуальних лічильників в Індії та Бразилії йде досить високими темпами [7].

Залежно від того з ким ви говорите про Smart Grid, від того яка його роль в екосистемі Smart Grid, ви отримаєте різні відповіді на питання в якому напрямку інтелектуальні мережі повинні розвиватися для досягнення найбільшого успіху. Варто враховувати, що існує не тільки велика кількість ключових етапів у процесі використання електроенергії (на які Smart Grid впливає найпрямішим чином), а й більшу кількість зацікавлених сторін, з різними очікуваннями та потребами. Це енергетичні компанії, що

виробляють та передають електроенергію, компанії, що виробляють обладнання, програмне забезпечення та інші компоненти, що використовуються Smart Grid та її споживачами.

Для прикладу, наведемо думку з цього питання віце-президента та співзасновника платформи управління споживанням електроенергії, що ґрунтується на технології хмарних обчислень EcoFactor [8]:

1. Обмін даними між споживачами електрики та енергетичними компаніями. Якщо буде доступно більше інформації про використання, стане можливим більш точне прогнозування, що дозволить значно підвищити енергоефективність.

2. Зберігання електроенергії. У періоди низького попиту має бути можливість зберігати надлишок електроенергії, який надалі зможе бути використаний у пікові періоди. Приклад зберігання електрики у невеликих обсягах – електромобіль.

3. Автоматизація енергоефективності споживачам. Домовласники часто не бажають витрачати час і гроші, щоб зробити своє оточення (будинки, автомобілі, офіси тощо) більш енергоефективним. Для зменшення навантаження на мережу та зниження енергоспоживання необхідно більше автоматичних сервісів, які зроблять «вибір» електроенергії більш інтелектуальним.

4. Необхідно задовольняти потреби ринку приватним сектором, покладаючись як на державне фінансування. Приватні компанії повинні займатися розробкою продуктів та послуг, що задовольняють зростаючі запити споживачів у цій галузі.

Незалежно від джерел інновацій, продуктів та послуг, інфраструктура Smart Grid обслуговуватиме споживачів електроенергії, що генерують та передають компанії, використовуючи передові інформаційні технології в раніше «німій» електромережі. Наголошуючи на пошуку, зборі, аналізі та наданні інформації, що передається в обох напрямках між споживачами та виробниками електроенергії, потенціал збереження електроенергії та

вдосконалення поточної моделі споживання електроенергії зможе задовольнити всіх [8].

Контрольні питання до розділу 1

1. У чому суть концепції Smart Grid?
2. Яку роль відіграють датчики у сучасних вимірювальних системах?
3. У чому специфіка вимірювальних систем електромеханічних комплексів?
4. Яке місце займають вимірювальні системи у сучасних енергетичних комплесах?
5. Яке значення мають датчики у сучасних інтелектуальних системах?

Розділ 2 Загальні відомості про датчики

2.1 Загальна інформація

Датчик (вимірювальний перетворювач, чутливий елемент) – пристрій, призначений для того, щоб інформацію, що надходить на його вхід у вигляді деякої фізичної величини, функціонально перетворити в іншу фізичну величину на виході, більш зручну для впливу на наступні елементи (блоки).

Основною характеристикою датчика є залежність його вихідної величини y від вхідний x, тобто y = f(x). На рис.2.1 зображені деякі розповсюджені види залежності вихід-вхід датчиків [9].

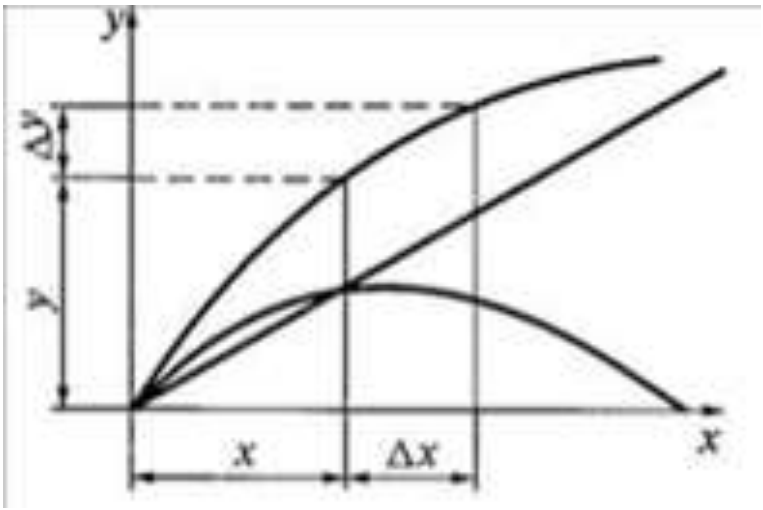


Рисунок 2.1. – Види основної характеристики давачів

Види датчиків розрізняють за принципом виробленого ними перетворення [8]:

·– параметричні (або пасивні), у яких зміна контрольованої величини x супроводжується відповідними змінами активного, індуктивного і ємнісного опорів датчика. Наявність стороннього джерела енергії є обов'язковою умовою роботи параметричного датчика;

·– генераторні (або активні), у яких зміна контрольованої величини x супроводжується відповідними змінами ЕРС на виході датчика (наприклад, виникнення ЕРС може відбуватися внаслідок термо-, п’єзо-, фотоефекта й інших явищ, що викликають появу електричних зарядів). Ці датчики

виконуються за схемою, яка не вимагає додаткового джерела енергії, тому що енергія на виході елемента повністю береться з його входу (внаслідок чого потужність вихідного сигналу завжди менше потужності вхідного сигналу).

Залежно від виду контрольованої неелектричної величини розрізняють датчики механічні, теплові, оптичні й ін [10].

Часто застосовуються електричні датчики із проміжним перетворенням, тобто механічний датчик поєднують із електричним. Перетворення контрольованої величини в таких датчиках відбувається за схемою: вимірювана величина - механічне переміщення - електрична величина.

Елемент, що перетворить вимірювану величину в переміщення, називається первинним перетворювачем або первинним вимірником (ПВ). Наприклад, тиск перетвориться в переміщення стрілки манометра ПВ, яке потім перетвориться в зміну активного опору (провідниковій, резисторний (або реостатний) датчики й ін.).

Підсилювач - елемент автоматики, що здійснює кількісне перетворення (найчастіше посилення) вхідної на його вхід фізичної величини (струму, потужності, напруги, тиску й т.п.). Підсилювач обов'язково повинен мати додаткове джерело енергії z. Основною характеристикою підсилювача є залежність y = f(x); при цьому звичайно прагнуть до одержання лінійної або близької до неї характеристики на робочій ділянці. Величини на вході й виході підсилювача мають однакову фізичну природу.

За принципом дії підсилювачі розділяються на електронні, напівпровідникові, магнітні, електромашинні, пневматичні, гідравлічні.

Стабілізатор – елемент автоматики, що забезпечує сталість вихідної величини y при коливаннях вхідної величини x у певних межах. Ефект стабілізації досягається за рахунок зміни параметрів елементів, що входять у схему стабілізатора; при цьому вид енергії на його вході й виході повинен бути той самий [11].

Залежно від виду величини, яка стабілізується, розрізняють стабілізатори напруги й струму, що забезпечують сталість напруги або струму в навантаженні при коливаннях вхідної напруги й опору навантаження.

3.2 Класифікація датчиків

Системи класифікації датчиків можуть бути різними, від дуже простих до складних. Критерій класифікації завжди вибирається залежно від мети проведення класифікації.

Наведемо одну із схем можливої класифікації датчиків [12].

Класифікація за видом сенсора:

- активні (генераторні);
- пасивні (параметричні).

Класифікація за вибором точки відліку:

- абсолютні;
- відносні.

Класифікація за зовнішньою дією (вимірювальною величиною):

- датчики тиску:
- абсолютного тиску;
- відносного тиску;
- розрідження;
- тиску-розрідження;
- різниці тисків;
- гідростатичного тиску;
- датчики витрати:
- механічні лічильники витрати;
- перепадоміри;
- ультразвукові витратоміри;
- електромагнітні витратоміри;
- коріолісові витратоміри;

- вихрові витратоміри;
- датчики рівня:
- поплавкові;
- ємнісні;
- радарні;
- ультразвукові;
- датчики температури:
- відносні (сенсор – термопара);
- абсолютні (сенсор – терморезистор);
- пірометр;
- давачі концентрації:
- кондуктометри;
- датчики радіоактивності:
- іонізаційна камера;
- датчик прямого заряду;
- датчики переміщення:
- абсолютний шифратор;
- відносний шифратор;
- LVDT (лінійний диференційний перетворювач, що регулюється);
- позиційні вимикачі:
- контактні;
- безконтактні;
- датчики кутового положення:
- сельсин;
- перетворювач кут – код (енкодер);
- RVDT (обертний диференційний перетворювач, що регулюється);
- датчики вібрацій:
- п’єзоелектричний;
- вихрострумовий;
- датчики механічних величин:

- відносного розширення;

- абсолютного розширення.

Класифікація за характеристиками:

- чутливість;

- стабільність;

- точність;

- гістерезис;

- швидкодія;

- діапазон вхідних значень;

- формат вихідного сигналу;

- інші.

Класифікація за кількістю вхідних величин:

- одномірні;

- багатомірні.

Класифікація за принципом дії:

- фотоелектричні (оптичні);

- магнітоелектричні (за принципом ефекту Холла);

- п’єзоелектричні;

- тензодавачі;

- ємнісні;

- потенціометричні;

- індуктивні;

- індукційні;

- ультразвукові.

Класифікація за принципом реалізації вихідних перетворювачів:

- з дискретним виходом:

- статичні;

- електромеханічні;

- з аналоговим виходом;

- з цифровим виходом.

Класифікація за конструкцією:

- моноблочний;

- складений (складається з окремих конструктивних частин).

На рис. 2.3 показаний комплекс, що складається з комбінації різних датчиків, приводів і сигналізаторів, застосовуваний у корпорації МББап для підвищення безпеки автомобіля [13].

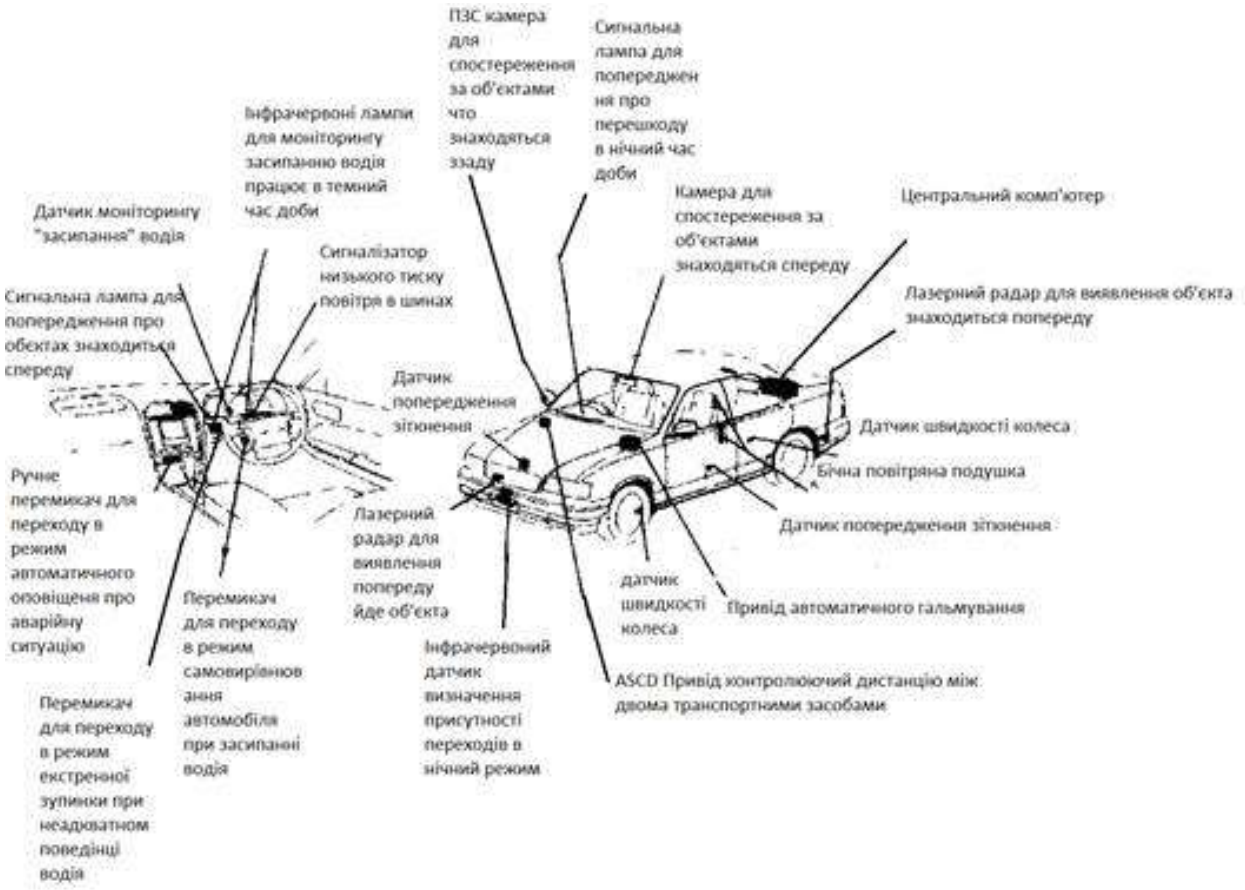


Рисунок 2.3 – Система безпеки автомобіля (Nissan Motor Company)

До його складу входять дві системи, що борються із засипанням водія за кермом автомобіля. Дія однієї з цих систем спрямоване на попередження водія, а інший – на вирівнювання курсу автомобіля. Для виконання цих функцій необхідні спеціальні датчики, роль яких можуть грати сенсори стеження за очним яблуком водія і детектори нахилу його голови. У систему видачі сигналу необхідності екстреного гальмування, побудовану на основі датчиків мікрохвильового, ультразвукового і інфрачервоного діапазонів, часто входить пристрій випереджаючого включення індикаторів

гальмування, що дозволяє заздалегідь попередити про небезпеку водіїв транспортних засобів, що їдуть позаду. До складу системи попередження про перешкоди входять інфрачервоні детектори та радар. Адаптивна система круїз-контролю починає працювати в момент, коли водій занадто наблизився до попереду йде транспортному засобу: при цьому швидкість автомобіля негайно знижується для забезпечення безпечної дистанції. Пристрій моніторингу пішоходів визначає присутність людей на дорозі в темний час доби і в зонах, закритих для огляду, і попереджає про це водія автомобіля. Система контролю смуги руху визначає ситуації, при яких відхилення автомобіля відбувається не з волі водія. При цьому система оповіщає водія про відхід зі смуги і автоматично вирівнює транспортний засіб [14].

Для того щоб віднести датчик до тієї чи іншої групи необхідно знати, які величини він може вимірювати, його характеристики, на якому фізичному принципі він реалізований, який механізм перетворень він застосовує, з якого матеріалу він виготовлений, яка область його застосування.

Розрізняють три класи датчиків:

– аналогові датчики, тобто датчики, що виробляють аналоговий сигнал;

– цифрові датчики, що генерують послідовність імпульсів або двійкове слово;

– бінарні (двійні) датчики, які виробляють сигнал тільки двох рівнів: "включено/вимкнено" (інакше кажучи, 0 або 1).

Динамічні властивості датчика характеризуються цілим рядом параметрів, які, однак, досить рідко наводяться в технічних описах виробників. Динамічну характеристику датчика можна експериментально отримати як реакцію на стрибок вимірюваної вхідної величини (рис. 2.4). Параметри, що описують реакцію датчика, дають уявлення про його швидкості (наприклад, час наростання, запізнювання, час досягнення першого максимуму), інерційних властивостях (відносне перерегулювання, час встановлення) і точності (зсув) [15].

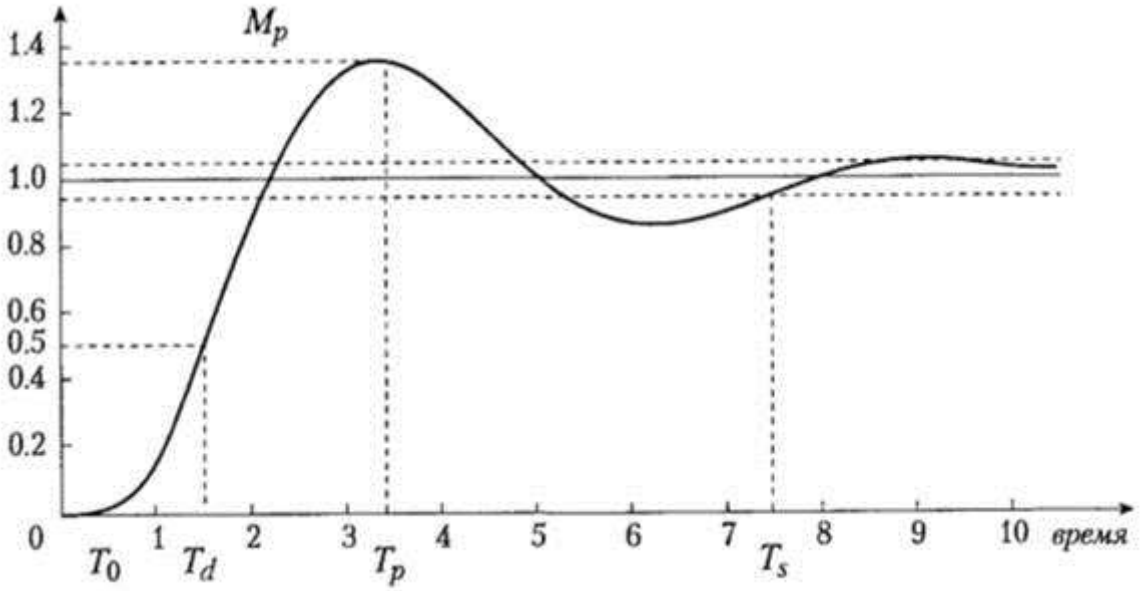


Рисунок 2.4 – Динамічна реакція датчика (реакція на стрибок):

T_0 – час проходження зони нечутливості, T_d – запізнювання, T_p – час досягнення першого максимуму, T_s – час встановлення, M_p – перерегулювання

Параметри [16]:

1. Час проходження зони нечутливості (dead time) – час між початком зміни фізичної величини і моментом реакції датчика, тобто моментом початку зміни вихідного сигналу.

2. Запізнення (delay time) – час, через який показання датчика перший раз досягають 50 % сталого значення. У літературі зустрічаються й інші визначення запізнювання.

3. Час наростання (rise time) – час, за який вихідний сигнал збільшується від 10 до 90 % сталого значення. Інше визначення часу наростання – величина, зворотна нахилу кривої реакції датчика на стрибок вимірюваної величини в момент досягнення 50 % від сталого значення, помножене на стале значення. Іноді використовуються інші визначення. Малий час наростання завжди вказує на швидку реакцію.

4. Час досягнення першого максимуму (peak rime) – час досягнення першого максимуму вихідного сигналу (перерегулирования).

5. Час перехідного процесу, час встановлення (settling time) – час, починаючи з якого відхилення виходу датчика від сталого значення стає менше заданої величини (наприклад, ± 5 %).

6. Відносне перерегулювання (percentage overshoot) – різниця між максимальним і сталим значеннями, віднесена до сталому значенню (у відсотках).

7. Статична помилка (steadystate error) – відхилення вихідної величини датчика від істинного значення або зсув. Може бути усунена калібруванням датчика.

У реальних умовах деякі вимоги до датчиків завжди суперечать один одному, тому всі параметри не можна мінімізувати одночасно.

Статичні характеристики датчика показують, наскільки коректно вихід датчика відображає вимірювану величину через деякий час після її зміни, коли вихідний сигнал встановився на нове значення. Важливими статичними параметрами є: чутливість, роздільна здатність або дозвіл, лінійність, дрейф нуля і повний дрейф, робочий діапазон, повторюваність і відтворюваність результату.

8. Чутливість (sensitivity) датчика визначається як відношення величини вихідного сигналу до одиничної вхідний величиною (для тонких вимірювальних технологій визначення чутливості може бути більш складним).

9. Дозвіл (resolution) – це найменша зміна вимірюваної величини, яке може бути зафіксовано і точно показано датчиком.

10. Лінійність (linearity) не описується аналітично, а визначається виходячи з градуировочной кривої датчика. Статична градуировочная крива показує залежність вихідного сигналу від вхідного при стаціонарних умовах. Близькість цієї кривої до прямої лінії і визначає ступінь лінійності. Максимальне відхилення від лінійної залежності виражається у відсотках.

11. Статична посилення (static gain) або посилення по постійному струму (dc gain) – це коефіцієнт посилення датчика на дуже низьких

частотах. Великий коефіцієнт посилення відповідає високої чутливості вимірювального пристрою.

12. Дрейф (drift) визначається як відхилення показань датчика, коли вимірювана величина залишається постійною протягом тривалого часу. Величина дрейфу може визначатися при нульовому, максимальному або деякому проміжному значенні вхідного сигналу. При перевірці дрейфу нуля вимірювана величина витримується на нульовому рівні або рівні, який відповідає нульовому вихідному сигналу, а перевірка дрейфу на максимумі виконується при значенні вимірюваної величини, відповідному верхньої межі робочого діапазону датчика. Дрейф датчика викликається нестабільністю підсилювача, зміною навколишніх умов (наприклад, температури, тиску, вологості або рівня вібрацій), параметрів електропостачання або самого датчика (старіння, вироблення ресурсу, нелінійність і т.д.).

Робочий діапазон (operating range) датчика визначається допустимими верхнім і нижнім межами значення вхідної величини або рівня вихідного сигналу.

13. Повторюваність (repeatability) характеризується як відхилення між кількома послідовними вимірами при заданому значенні вимірюваної величини в однакових умовах, зокрема наближення до заданого значення має відбуватися завжди і або як наростання, або як спадання. Вимірювання повинно бути виконані за такий проміжок часу, щоб не виявлявся вплив дрейфу. Повторюваність зазвичай виражається у відсотках від робочого діапазону.

14. Відтворюваність (reproducibility) аналогічна повторюваності, але вимагає більшого інтервалу між вимірами. Між перевірками на відтворюваність датчик повинен використовуватися за призначенням і, більше того, може бути підданий калібрування. Відтворюваність задається у вигляді відсотків від робочого діапазону, віднесених до одиниці часу (наприклад, місяця).

З приходом нових контролерів з'явилися й нові аналогові датчики, що працюють за протоколом HART (Highway Addressable Remote Transducer), що перекладається як «Вимірювальний перетворювач, який дистанційно адресується через магістраль» [14].

Вихідний сигнал датчика (польового пристрою) є аналоговим струмовим сигналом діапазону 4...20мА, на який накладається частотно модульований (FSK - Frequency Shift Keying) сигнал цифрового зв'язку.

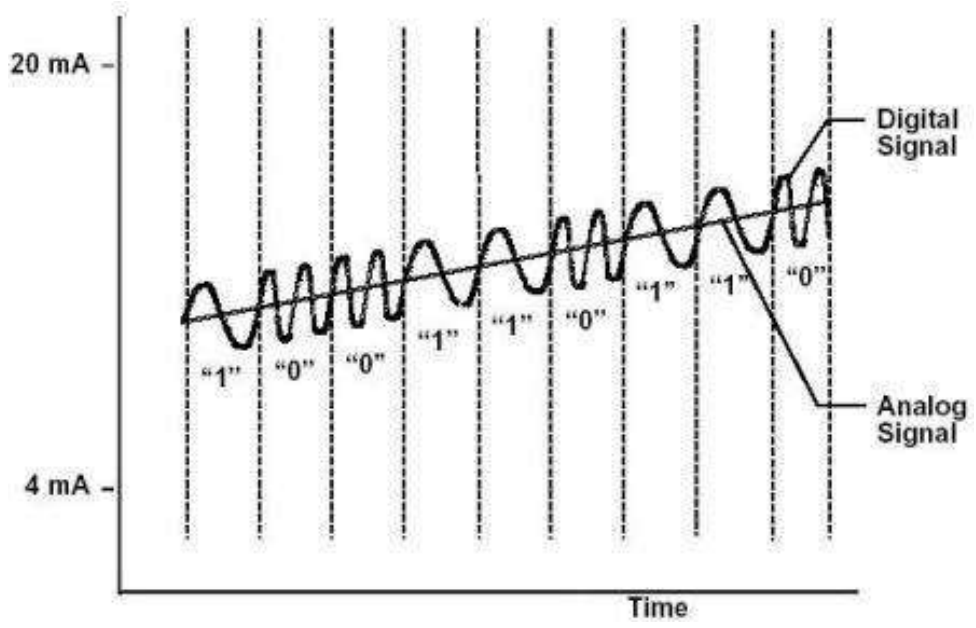


Рисунок 2.5 – Вихідний сигнал аналогового датчика за протоколом HART

На рисунку показаний аналоговий сигнал, а навколо нього, як змія, звивається синусоїда. Це і є частотно - модульований сигнал. Але це ще зовсім не цифровий сигнал, його ще доведеться розпізнати. На рисунку помітно, що частота синусоїди під час передачі логічного нуля вище (2,2КГц), ніж за передачі одиниці (1,2КГц). Передача цих сигналів здійснюється струмом амплітудою ±0,5мА синусоїдальної форми.

Відомо, що середнє значення синусоїдального сигналу дорівнює нулю, тому на вихідний струм датчика 4 ... 20мА передача цифрової інформації впливу не надає. Такий режим використовується для настроювання датчиків.

Зв'язок протоколу HART здійснюється двома способами. У першому випадку, стандартному, двопровідної лінії можуть обмінюватися

інформацією тільки два пристрої, при цьому вихідний аналоговий сигнал 4...20мА залежить від вимірюваної величини. Такий режим застосовується для настроювання польових пристроїв (датчиків).

У другому випадку до двопровідної лінії може бути підключено до 15 датчиків, кількість яких визначається параметрами лінії зв'язку та потужністю блоку живлення. Це режим багатоточкового зв'язку. У цьому режимі кожен датчик має свою адресу в діапазоні 1 ... 15, яким до нього звертається пристрій управління.

Датчик з адресою 0 від лінії зв'язку вимкнено. Обмін даними між датчиком та пристроєм керування в багатоточковому режимі здійснюється лише частотним сигналом. Струменевий сигнал датчика зафіксований на необхідному рівні і не змінюється.

Під даними у разі багатоточкового зв'язку маються на увазі не тільки результати вимірювань контрольованого параметра, але ще й цілий набір всілякої службової інформації.

Насамперед це адреси датчиків, команди управління, параметри налаштування. І вся ця інформація передається двопровідними лініями зв'язку. Щоправда, робити це треба обережно, лише у тих випадках, коли бездротове з'єднання не зможе вплинути на безпеку контрольованого процесу [16].

Виявляється, позбутися дротів можна. Вже в 2007 році був опублікований Стандарт WirelessHART, середовищем передачі є неліцензійна частота 2,4 ГГц, на якій працюють багато комп'ютерних бездротових пристроїв, у тому числі і бездротові локальні мережі. Тому і WirelessHART-пристрої можна використовувати без жодних обмежень. На рис 2.6 показано бездротову мережу WirelessHART [15].

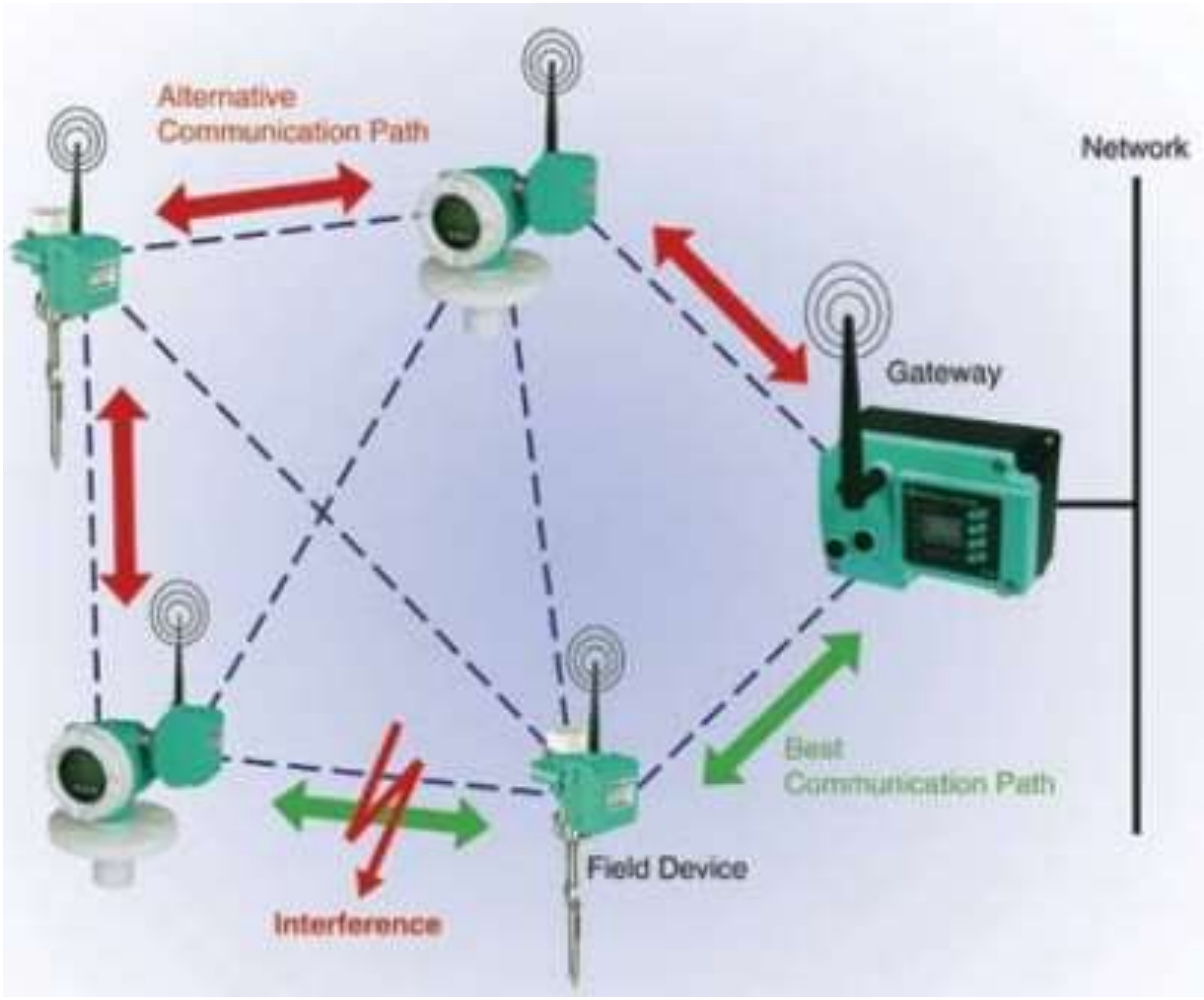


Рисунок 2.6 – Бездротова мережа WirelessHART

Ось такі технології прийшли на зміну старій аналоговій струмовій петлі. Але вона свої позиції не здає, широко застосовується скрізь, де це можливо.

2.3 Принцип дії вимірювальних приладів різних систем

Під системою приладу розуміють принцип дії вимірювального приладу. Існує значна кількість систем приладів. У більшості електровимірювальних приладів рухома частина рухається внаслідок створення обертального моменту, який виникає внаслідок взаємодії магнітних або електричних полів. Момент, що протидіє обертальному, може створюватися механічною силою або електромагнітною силою.

Прилади магнітоелектричної системи. Прилади магнітоелектричної системи працюють за принципом взаємодії магнітного поля нерухомого

постійного магніту з магнітним полем провідника зі струмом, що проходить по рухомій котушці.

Принцип дії приладу магнітоелектричної системи пояснюється на рис.2.7 [16].

Вимірювальний механізм приладу складається з нерухомого підковоподібного магніту 1 з полюсними закінченнями N та S, нерухомого сталевого циліндра 2, рухомої котушки 3, стрілки і спіральної пружини 4. Струм у котушку подається через дві спіральні пружини, що ізольовані від осі. Ці пружини також призначені для створення протидіючого моменту. Обертальний момент, що діє на рухому частину вимірювального механізму, і кут повороту стрілки є пропорційними величині вимірюваного струму. Тому шкала магнітоелектричних приладів є рівномірною.

Переваги. У приладів магнітоелектричної системи висока чутливість, велика точність, мала чутливість до зовнішніх магнітних полів, швидке заспокоєння, мале споживання електричної енергії.

Недоліками приладів магнітоелектричної системи є робота лише за постійного струму, слабка перевантажувальна здатність, порівняно висока вартість.

Магнітоелектрична система застосовується в амперметрах та вольтметрах постійного струму.

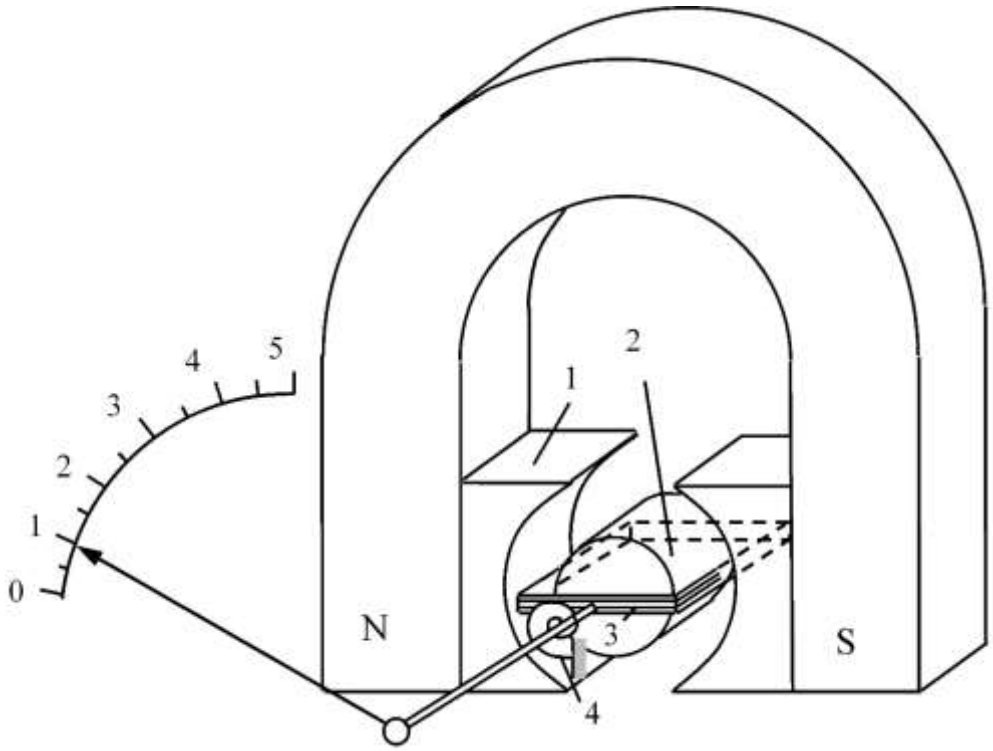


Рисунок 2.7 – Принцип дії приладу магнітоелектричної системи

1 – підковоподібний магніт; 2 – нерухомий сталевий циліндр; 3 – рухома котушка; 4 – спіральна пружина

При з’єднанні магнітоелектричного механізму і напівпровідникового випрямляча одержуємо детекторний прилад. При з’єднанні механізму з термопарами одержуємо термоелектричний прилад [17].

Прилади електромагнітної системи мають нерухому котушку, через обмотки якої протікає електричний струм, що вимірюється, та розташовану на осі зі стрілкою феромагнітну пластину (пелюсток). При протіканні електричного струму через нерухому котушку котушка створює магнітне поле, яке втягує пелюсток всередину котушки.

Принцип дії приладу електромагнітної системи пояснюється на рис. 2.8.

Вимірювальний механізм приладу складається з котушки 1 з вузькою щілиною усередині, осердя у виді пелюстка з м’якої сталі 2, що, повертаючись навколо осі, може входити в щілину котушки. З віссю пов’язані стрілка, поршень повітряного заспокоювача і спіральна пружина,

що створює протидіючий момент. При протіканні струму по котушці осердя втягується усередину котушки із силою, прямо пропорційною квадрату сили струму [18].

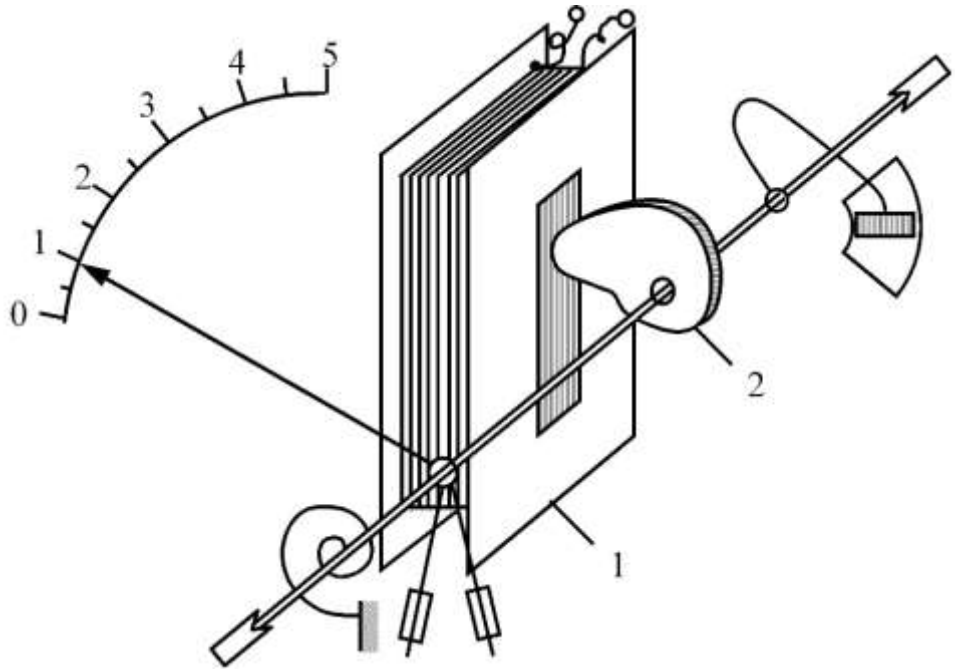


Рисунок 2.8 – Принцип дії приладу електромагнітної системи
1 – нерухома котушка; 2 – пелюсток із м’якої сталі

Обертальний момент приладу пропорційний квадрату сили струму і зміні індуктивності системи при повороті рухомої частини.

Прилади електромагнітної системи мають нерівномірну шкалу, їх показання залежать від впливу зовнішніх магнітних полів і мають малу точність.

До позитивних якостей приладів електромагнітної системи слід віднести простоту конструкції, стійкість до перевантажень, придатність до роботи на постійному та змінному струмах, дешевину, можливість виготовлення приладів, розрахованих на великі струми [19].

Недоліками приладів електромагнітної системи є нерівномірність шкали, особливо в початковій частині, власне споживання електричної енергії, залежність показань від впливу зовнішніх магнітних полів.

Електромагнітна система застосовується в щитових амперметрах та вольтметрах змінного струму.

У приладах електромагнітної системи для усунення впливу зовнішніх магнітних полів може застосовуватися астатичний вимірювальний механізм. Астатичний вимірювальний механізм складається з двох нерухомих обмоток та двох осердь на одній осі. Обмотки вмикаються послідовно таким чином, щоб їх магнітні потоки були зустрічними, а моменти, що діють на осердя – узгодженими. При цьому зовнішній магнітний потік посилює обертальний момент одного осердя і послаблює обертальний момент другого осердя. Загальний обертальний момент не залежить від зовнішнього магнітного поля.

Робота приладів електродинамічної системи ґрунтується на взаємодії магнітних полів провідників зі струмами: два провідники із протилежно спрямованими струмами взаємно відштовхуються, з однаково спрямованими струмами – притягуються.

Принцип дії приладу електродинамічної системи пояснюється на рис. 2.9 [20].

Вимірювальний механізм складається з двох котушок: нерухомої і рухомої, розташованої всередині нерухомої котушки. Рухома котушка розташована на одній осі зі стрілкою, крилом повітряного заспокоювача і двома спіральними пружинами. При проходженні струму $I_н$ по нерухомій котушці і струму $I_р$ по рухомій котушці між ними виникає сила взаємодії; при цьому на рухому котушку діє пара сил, що викликає її поворот. За постійного струму момент сил і кут повороту рухомої котушки є пропорційними добутку струмів у котушках.

Електродинамічна система застосовується в амперметрах, вольтметрах та ватметрах змінного струму. Залежно від призначення приладів, їх котушки з’єднуються по-різному:

– в амперметрах, розрахованих на малий струм (до 0,5 А), обидві котушки вмикаються послідовно, а для струму більше 0,5 А – паралельно;

– у вольтметрах обидві котушки завжди вмикаються послідовно;

– у ватметрах котушки не з’єднані електрично і мають по дві зовнішні клеми для підключення до мережі. Відносно приймача нерухома котушка (струмова котушка) включається послідовно, а рухома котушка (котушка напруги) – паралельно.

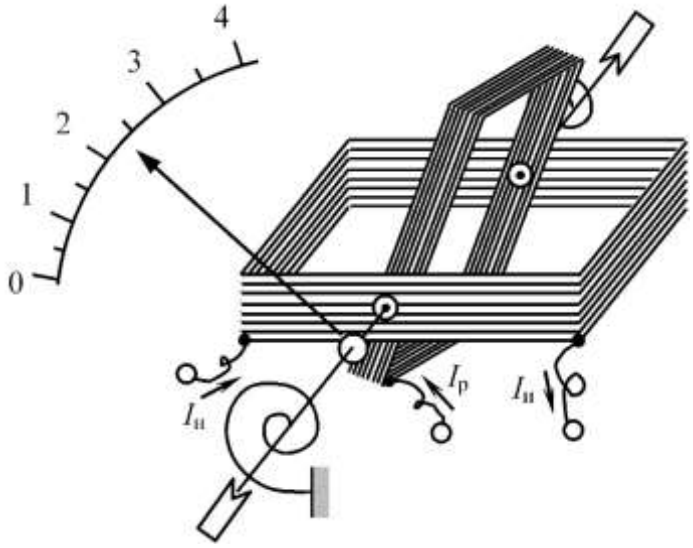


Рисунок 2.9 – Принцип дії приладу електродинамічної системи

До позитивних якостей приладів електродинамічної системи слід віднести їх високу точність і можливість застосування в колах змінного і постійного струму [21].

Недоліки приладів електродинамічної системи: через складність виготовлення прилади мають високу вартість, через погані умови охолодження і власне споживання енергії електродинамічні механізми не повинні перевантажуватися.

Електростатична система вимірювального приладу є різновидністю плоского конденсатора. Відхилення рухомої частини є наслідком зміни ємності конденсатора.

Принцип дії приладу електростатичної системи пояснюється на рис. 2.10.

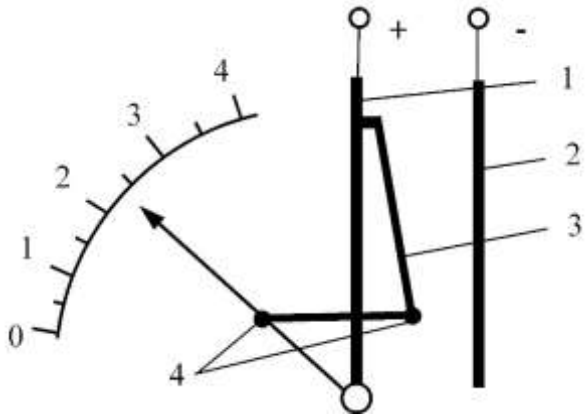


Рисунок 2.10 – Принцип дії приладу електростатичної системи

1, 2 – нерухомі пластини; 3 – рухома пластина; 4 – шарніри

Вимірювальний механізм складається з двох металевих ізольованих пластин 1 та 2, заряджених різнойменно, та рухомої пластини 3. До рухомої пластини 3 приєднано покажчик. Під дією напруги рухома пластина 3 відштовхується від пластини 1 та притягується до пластини 2. Покажчик показує зміну напруги [22].

Електростатична система застосовується у вольтметрах постійного та змінного струму.

До позитивних якостей приладів електростатичної системи слід віднести нечутливість до зовнішніх магнітних полів, можливість безпосереднього виміру великих напруг, мале споживання електричної енергії.

Недоліком приладів електростатичної системи є їх низька чутливість.

Феродинамічна система є різновидністю електродинамічної системи.

Принцип дії приладу феродинамічної системи пояснюється на рис. 2.11.

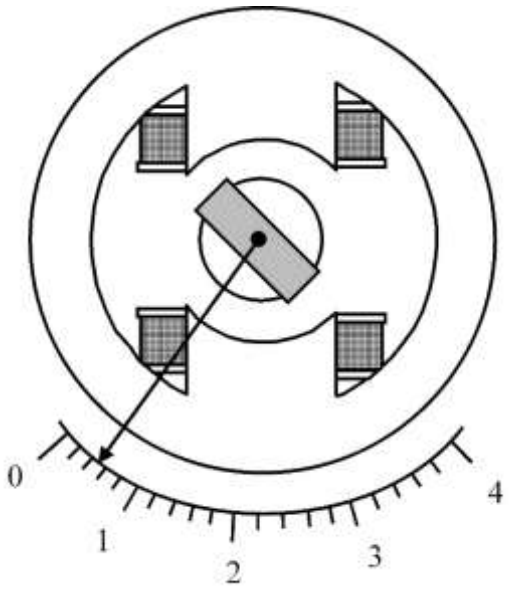


Рисунок 2.11 – Принцип дії приладу феродинамічної системи

Для посилення магнітного поля обмотку нерухомої котушки розташовують на стальному осерді, а рухома котушка обертається навколо нерухомого циліндричного осердя. При такому виконанні прилади захищені від впливу зовнішніх магнітних полів [23].

Феродинамічна система застосовується в щитових ватметрах.

Принцип дії приладів індукційної системи базується на взаємодії магнітного поля, що обертається, з вихровими струмами, що індукуються цим полем у рухомому металевому диску (роторі). Магнітне поле, що обертається, отримується за допомогою двох змінних магнітних потоків, зсунутих у просторі і за фазою один відносно другого.

Принцип дії приладу індукційної системи пояснюється на рис. 2.12.

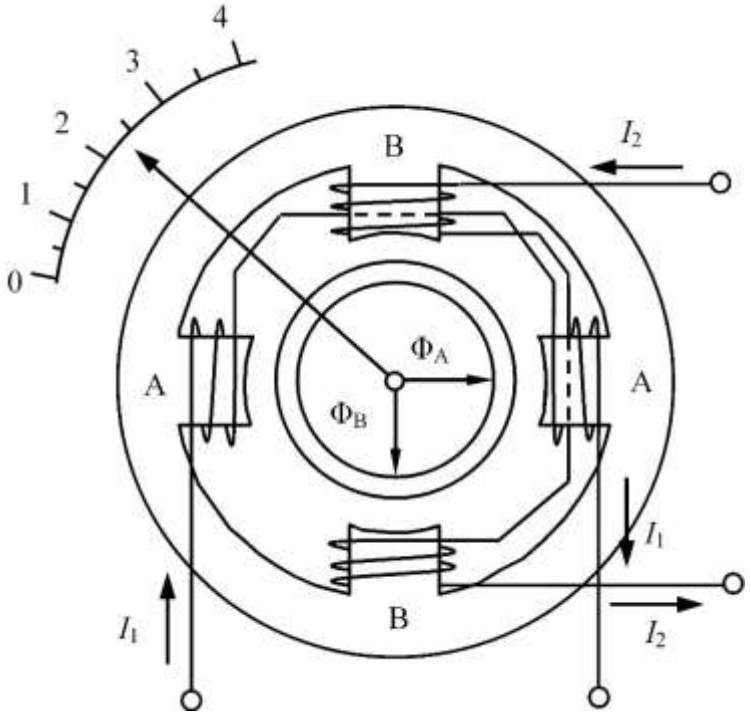


Рисунок 2.12 – Принцип дії приладу індукційної системи

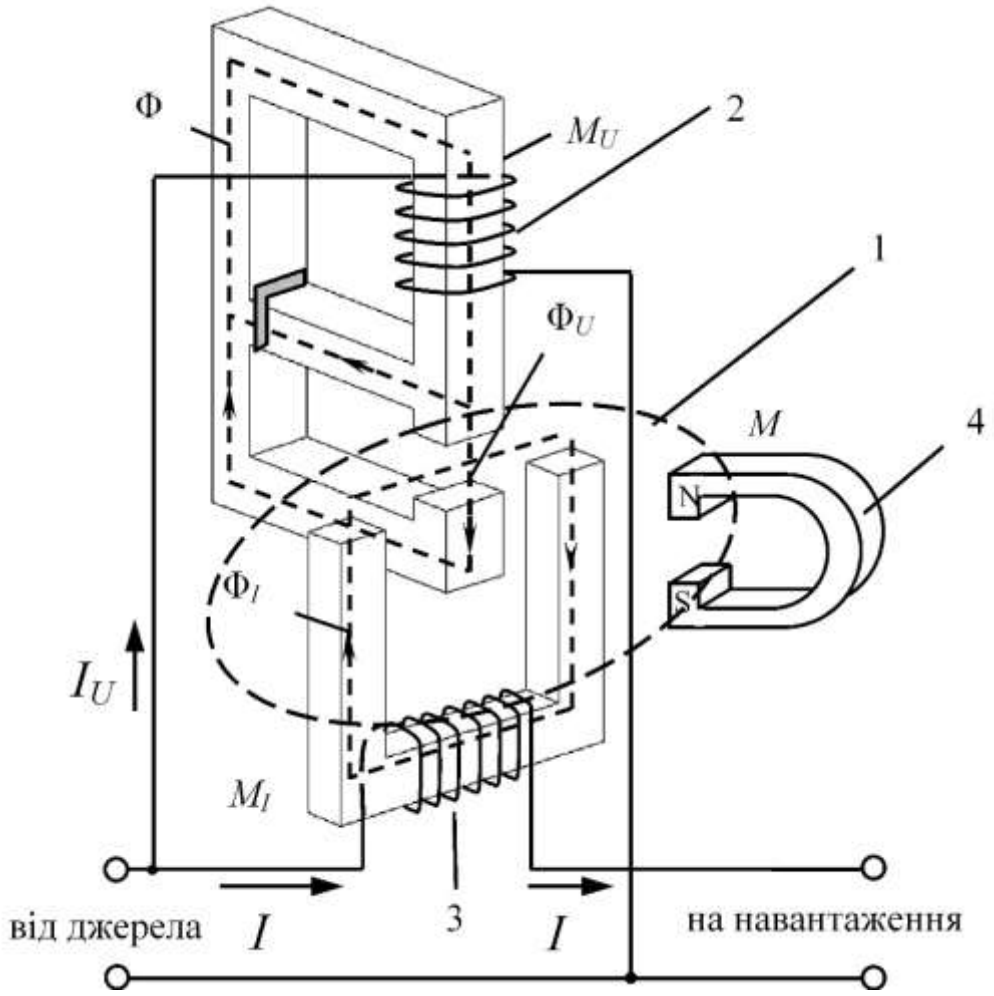
Струми I_1 та I_2 створюють два змінних магнітних потоки Φ_A та Φ_B полюсів АА та ВВ, осі яких є взаємно перпендикулярними. Якщо потоки Φ_A та Φ_B зсунуто за фазою, то створюється магнітне поле, що обертається. Ротор зі стрілкою намагається почати обертатися.

Робота приладів індукційної системи не залежить від впливу зовнішніх магнітних полів. Прилади є стійкими до перевантажень, тривкими за конструкцією і надійними в роботі.

Прикладом приладу індукційної системи є однофазний індукційний лічильник електричної енергії (рис. 2.13) [24].

Алюмінієвий диск знаходиться у змінному магнітному полі. Обмотка електромагніту M_U ввімкнена на напругу електричної мережі змінного струму, обмотка електромагніту M_I ввімкнена послідовно в коло навантаження. Магнітний потік Φ_U є пропорційним напрузі мережі. Магнітний потік Φ_I є пропорційним струму навантаження мережі. Під дією обертального моменту алюмінієвий диск обертається, гальмування диска

здійснюється постійним магнітом М. На осі диска розташовано обліковий механізм електричної енергій [25].



Рисуноу 2.13 – Принцип дії однофазного індукційного лічильника електричної енергії

1 – алюмінієвий диск; 2 – обмотка електромагніту, ввімкнена на напругу електричної мережі; 3 – обмотка електромагніту, ввімкнена послідовно в коло навантаження; 4 – постійний магніт

Порядок вмикання однофазного індукційного лічильника електричної енергії показано на рис. 2.14.

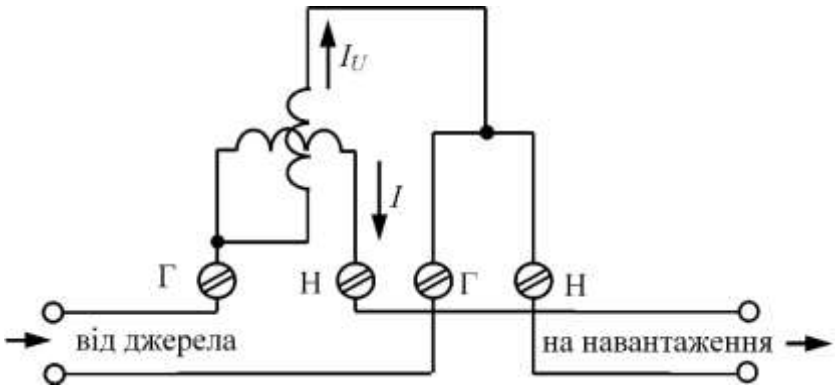


Рисунок 2.14 – Порядок вмикання однофазного індукційного лічильника електричної енергії

Для реєстрації величин, що швидко змінюються, застосовують електронно-променевий осцилограф. Спрощена блок-схема електронно-променевого осцилографа подана на рис. 2.15 [25].

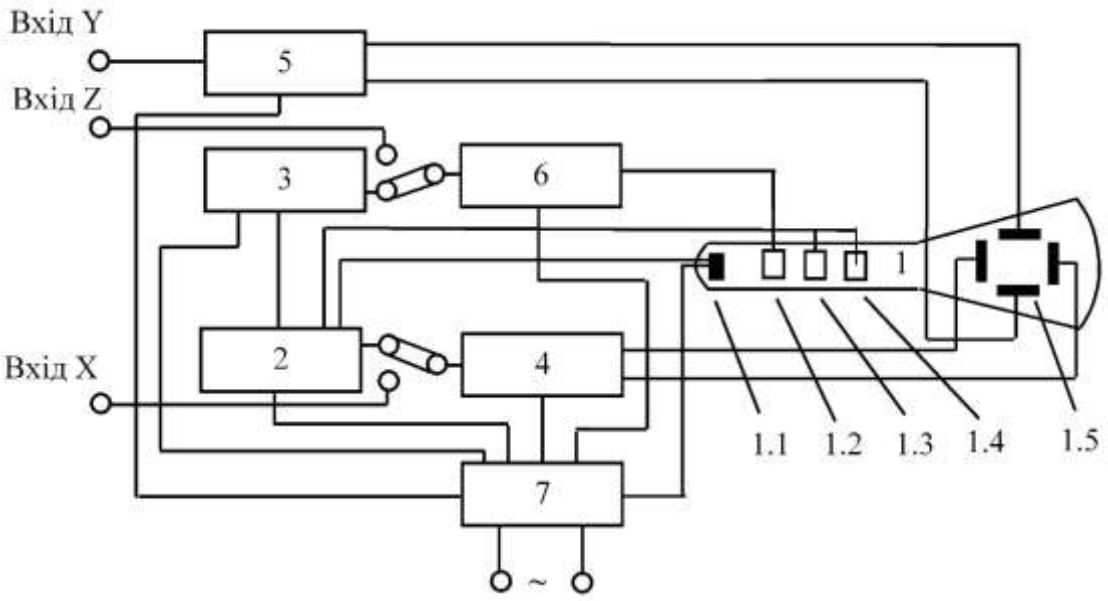


Рисунок 2.15 – Спрощена блок-схема електронно-променевого осцилографу 1 – електронно-променева трубка (1.1 – катод, 1.2 – електрод керування, 1.3 – перший анод, 1.4 – другий анод, 1.5 – відхилювальні пластини); 2 – генератор розгортки; 3 – генератор відміток часу; 4 – підсилювач горизонтального відхилення; 5 – підсилювач вертикального відхилення; 6 – підсилювач яскравості; 7 – блок живлення

Основною складовою частиною електронно-променевого осцилографа є електронно-променева трубка 1, в якій за допомогою електронного

прожектора (електронної пушки) формується вузький електронний промінь, який відхиляється у двох взаємно-перпендикулярних напрямках. Відхилення променя здійснюється за допомогою електричних полів, що створюються двома парами відхилювальних пластин 1.5. Екран електронно-променевої трубки покритий шаром люмінофору, на якому під дією електронного променя з'являється світлова пляма. При відхиленнях променя світлова пляма рухається по екрану, що дає світлове відображення досліджуваного процесу. Прожектор (електронна пушка) складається з катода 1.1, електрода керування 1.2 та двох анодів 1.3 та 1.4 [26].

Генератор розгортки 2 виробляє напругу, що змінюється за певним законом у часі і є необхідною для дослідження процесів, що швидко змінюються. Генератор відміток часу 3 виробляє серію періодичних сигналів для калібрування масштабу часу. Підсилювачі горизонтального відхилення 4, вертикального відхилення 5 та яскравості 6 підсилюють напругу до значень, необхідних для нормального керування променем осцилографа.

Електронно-променевий осцилограф може працювати у наступних основних режимах [27]:

- режим внутрішньої синхронізації;
- режим зовнішньої синхронізації;
- автоматичний режим;
- режим спеціальної розгортки.

Електронно-променевий осцилограф має основні органи керування:

- регулювання яскравості променя (здійснюється зміною напруги на електроді керування електронно-променевої трубки);

- фокусування променя (здійснюється зміною напруги на першому аноді прожектора (електронної пушки) відносно другого анода);

- регулювання променя по горизонталі та вертикалі (здійснюється подаванням постійної напруги на відповідні пари відхилювальних пластин);

- керування швидкістю розгортки, звичайно здійснюється двома ручками "плавно" та "грубо";

– регулювання чутливості відхилення по горизонталі та вертикалі.

Поняття про цифрові вимірювання параметрів електричних кіл. Цифрові вимірювальні прилади побудовані на елементах мікропроцесорної техніки. Цифрові вимірювальні прилади мають високу точність та чутливість вимірювання, є швидкісними, є можливість їх підключення до інших цифрових приладів. Недоліками цифрових вимірювальних приладів є їх складність, висока вартість виготовлення та ремонту [28].

Принципи електричних вимірювань неелектричних величин. Вимірювання неелектричних величин (наприклад, рівня рідини, температури тощо) здійснюється шляхом перетворення неелектричної величини в електричну величину, яка є залежною від неї і вимірюванням якої можна визначити й неелектричну величину.

Перетворювач – елемент вимірювального пристрою, який здійснює перетворення неелектричної величини в електричну. Розрізняють перетворювачі параметричні та генераторні.

Параметричний перетворювач – перетворювач, в якому неелектрична величина перетворюється у певний електричний параметр електричного кола (опір, ємність конденсатора, індуктивність котушки індуктивності тощо).

Генераторний перетворювач – перетворювач, в якому неелектрична величина перетворюється в ЕРС [29].

Види параметричних перетворювачів:

– реостатний перетворювач – здійснюється зміна величини опору реостата залежно від положення його рухомого контакту;

– термочутливий перетворювач – здійснюється зміна величини опору напівпровідникових резисторів залежно від температури;

– тензометричний перетворювач – здійснюється зміна величини опору матеріалів залежно від механічних напруг, що виникають, наприклад, при вигинанні (біметалічна пластина тощо);

– електромагнітний перетворювач – здійснюється зміна параметрів електромагнітного поля залежно від параметрів об’єкта вимірювання;

– ємнісний перетворювач – здійснюється зміна величини ємності конденсатора залежно, наприклад, від взаємного розташування пластин конденсатору;

– індуктивний перетворювач – здійснюється зміна величини індуктивності котушки індуктивності в залежності, наприклад, від положення осердя або взаємного розташування двох котушок;

– перетворювач вихрових струмів – інтенсивність генерації вихрових струмів в осерді, наприклад, котушки індуктивності, залежить від електропровідності. Чим більше інтенсивність генерації вихрових струмів, тм менше опір кола збудження.

Види генераторних перетворювачів:

- п’єзоелектричний перетворювач – у кристалі, наприклад, кварцу виникає ЕРС під зовнішнім механічним впливом, наприклад, тиском на поверхню;

- термоелектричний перетворювач – ЕРС термопари залежить від різниці температур її частин.

Контрольні питання до розділу 2

1. Що таке датчик?
2. Що таке перетворювач?
3. Наведіть класифікацію датчиків.
4. Наведіть принцип дії перетворювача.
5. Наведіть принцип дії аналогового дотчика.
6. Наведіть принцип дії цифрового датчика.

Розділ 3 Основні положення та визначення перетворюючих пристроїв приладів

3.1 Загальні положення та визначення

Сучасні засоби вимірювання складаються з вимірювальних перетворювачів, певним чином пов'язаних між собою (рис. 3.1) [25].

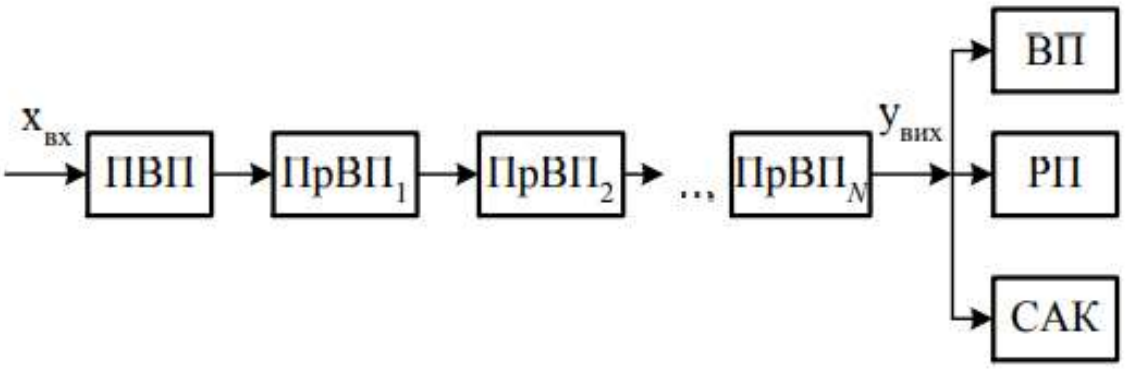


Рисунок 3.1 – Функціональна схема засобу вимірювання

Первинна інформація $x_{вх}$ надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача (ПВП), який функціонально пов'язаний з проміжними вимірювальними перетворювачами (ПрВП1, ПрВП2, ..., ПрВПN) так, що вихідна величина $y_{вих} = y_{вих}(x_{вх})$ (рис. 3.1).

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

Вимірювальний перетворювач – це засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передавання, подальшого перетворення та зберігання, але такої, що не може безпосередньо сприйматися спостерігачем [26].

Для прикладу розглянемо найпростіший однокомпонентний вимірювач (акселерометр) лінійних прискорень а маятникового типу (рис. 3.2), функціональну схему якого зображено на рис. 3.3.

Якщо точка підвісу маятника рухатиметься з прискоренням a, то під дією сили інерції P = ma маса маятника m відхилиться від вертикального положення на кут α (альфа) = α(a).

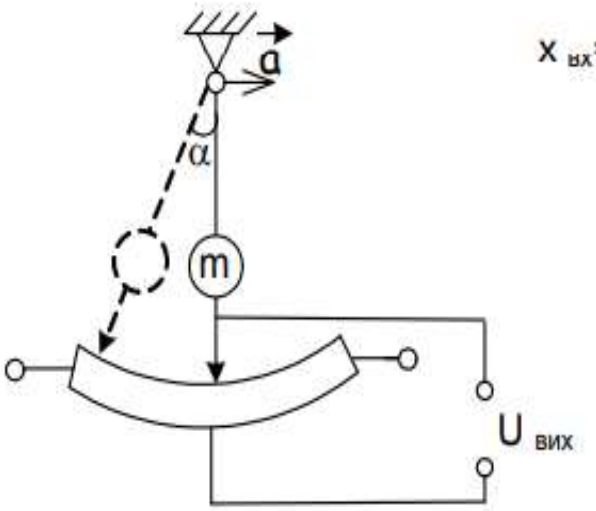


Рисунок 3.2– Акселерометр

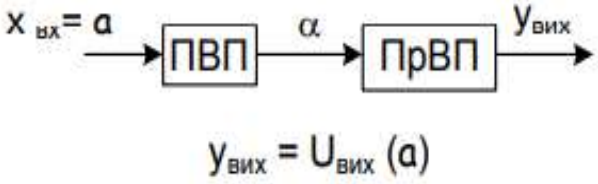


Рисунок 3.3 – Функціональна схема акселерометра

При цьому повзунок вихідного потенціометра переміститься і на виході буде напруга

$$u_{вих} = u_{вих}(a)$$

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

Таким чином, ПВП – це перетворювач, до якого підведено вимірювану величину, тобто перший перетворювач у вимірювальному колі [27].

Вимірювальне коло – це сукупність вимірювальних перетворювачів, що забезпечують всі перетворення сигналу вимірювальної інформації.

Чутливий елемент – частина першого у вимірювальному колі перетворюючого елемента, яка перебуває під безпосереднім впливом вимірюваної величини. У зазначеному прикладі чутливим елементом є маса маятника m, оскільки інерційні сили, що виникають при появі прискорення, насамперед діють на неї [28].

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

Масштабний вимірювальний перетворювач призначається для зміни вимірюваної величини (або проміжної інформації) у задане число разів (наприклад, подільник напруги, трансформатор, підсилювач тощо) [29].

3.2 Область застосування потенціометричних перетворювачів

Потенціометричні перетворювачі широко застосовуються в різних системах автоматики, лічильно-розв'язувальних пристроях і системах слідкуючого привода. Найчастіше вони перетворюють лінійні і кутові переміщення у відповідні напруги і застосовуються як подільники напруги. У лічильно-розв'язувальних пристроях ці перетворювачі використовуються для виконання різних математичних операцій. Потенціометричні перетворювачі належать до групи перетворювачів активного опору. Іноді їх називають реостатними або резистивними елементами [30].

3.3 Основні елементи конструкції перетворювачів

Потенціометричний перетворювач – це потенціометр, движок (щітка) якого механічно пов'язаний з попереднім елементом вимірювальної системи. Виходом попереднього елемента, тобто входом ПП, є лінійне або кутове переміщення. ПП мають такі переваги [7]:

1) здатність працювати як на змінному, так і на постійному струмі;

2) порівняно невеликі маси і габаритні розміри;

3) мало піддаються завадам з боку зовнішніх електричних і магнітних полів;

4) відсутність фазового зсуву вихідного сигналу;

5) можливість побудови перетворювачів із заданою характеристикою;

6) можливість отримання лінійної характеристики в широкому діапазоні вхідної величини (так, для ПП з кутовим переміщенням движка вхідна величина може змінюватися в діапазоні ± 180°, а в спеціальних конструкціях потенціометрів – до кількох тисяч градусів);

7) висока точність відтворення заданої залежності приросту опору від переміщення движка.

До недоліків ПП можна віднести:

1) наявність зворотної дії у вигляді моменту сил сухого тертя;

2) обмежений строк служби в зв'язку з наявністю деталей, що піддаються впливу тертя;

3) дискретний характер приросту вихідного сигналу;

4) невисока надійність, особливо під час роботи в умовах вібрацій та інерційних перевантажень;

5) під час переміщення щітки відносно обмотки ПП, а також в умовах вібрації можливе короткочасне порушення контакту, що спричиняє появу шуму на виході перетворювача, причому амплітуда шуму може наближатися до значення корисного сигналу.

У результаті дії шумів нормальна робота наступних елементів схеми (підсилювача, виконавчого пристрою тощо), а іноді й усієї схеми виявляється порушеною.

Ще шкідливіший вплив на систему мають шуми в тому разі, коли сигнал з датчика надходить на диференціюючий пристрій.

Розглянемо конструкцію одного з найпростіших і найпоширеніших ПП – однообертового кільцевого потенціометра з обмежено-круговим переміщенням движка, схему якого зображено на рис. 3.4, де 1 – ізольований каркас; 2 – намотаний на ньому ізольований дріт; 3 – струмознімаючий движок (щітка), що ковзає по дроту; 4 – струмознімаюче кільце; 5 – приводний валик. Ізоляція дроту для забезпечення електричного контакту з движком зачищена.

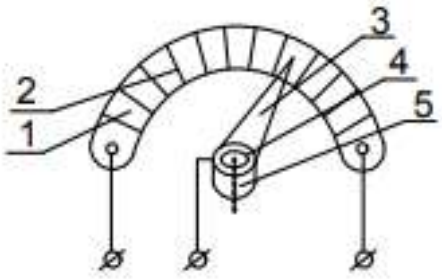


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення конструкції ПП

Напругу живлення подають до двох крайніх затискачів, вихідне значення напруги знімають між одним з крайніх і середнім затискачем, з'єднаним зі струмознімаючим кільцем 4, по якому ковзає щітка 3. Приводний валик 5 електричне ізольований від решти елементів движка. Матеріали спіралі обмотки – це звичайно емальований або оксидований дріт високого опору, виконаний з манганіну, ніхрому, константану, сплаву паладію з вольфрамом, сплаву платини з іридієм, платини з міддю, паладію зі сріблом, золота з нікелем [30].

До матеріалу спіралі висуваються такі основні вимоги: великий питомий опір, підвищена стабільність характеристик у часі, малий температурний коефіцієнт опору, достатньо висока твердість, корозійна стійкість, висока якість ізоляції, велика міцність на розрив і мале подовження при розтягу.

3.4 Основні вимоги, що ставляться до перетворювачів

До вимірювальних перетворювачів ставляться такі основні вимоги:

– висока надійність на весь термін служби або на міжремонтний строк;

– достатня стабільність характеристик під час зберігання та експлуатації;

– відповідність діапазонів зміни вхідних і вихідних величин;

– допустима інерційність у перетворенні вимірювальної інформації;

– відсутність зворотного впливу вихідної величини на вхідну і мінімально допустимий вплив на роботу попередніх вимірювальних перетворювачів.

Стабільність характеристик у часі t визначається стабільністю залежності [30]

$$y_{вих} = f(x_{вх})$$

причому зміна вихідної величини

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

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

У найпростішому випадку, якщо

$$y_{вих} = k_x x_{вх}$$

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

$$k_x(t) = const$$

або

$$\Delta k_x \leq \Delta k_{доп}$$

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

В умовах експлуатації перетворювачів

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

де, t – час; P – тиск навколишнього середовища; Θ° – його температура; n – перевантаження.

Тому в загальному випадку стабільність характеристики перетворювача визначається стабільністю залежності

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

або

$$\Delta k(t, \Theta^0, P, n\ldots) \leq k_{доп}$$

Відповідність діапазонів зміни вхідної та вихідної величин визначається за формулами

$$x_{вх\ min} \leq x_{вх}(t) \leq x_{вх\ max}$$

$$y_{вх\ min} \leq y_{вх}(t) \leq y_{вх\ max}$$

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

$$(Tp + 1)\, y_{вих} = kx_{вх}$$

то інерційність перетворення сигналу визначається сталою часу T перетворювача.

У такому разі допустима інерційність

$$T \le T_{доп}$$

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

$$T_п \le T_{п\ доп} \quad T_{п-1} \le T_{п-1\ доп} \quad \ldots\ldots T_2 \le T_{2\ доп} \quad T_1 \le T_{1\ доп}$$

Запізнювання у перетворювачі можна знайти із залежності (рис.3.5):

$$y_{вих}(t) = f[x_{вх}(t-\tau)];$$
$$t \le \tau \; y_{вих} = 0, якщо\ x_{вх} \ne 0;$$
$$t > \tau \; y_{вих} \ne 0, якщо\ x_{вх} \ne 0.$$

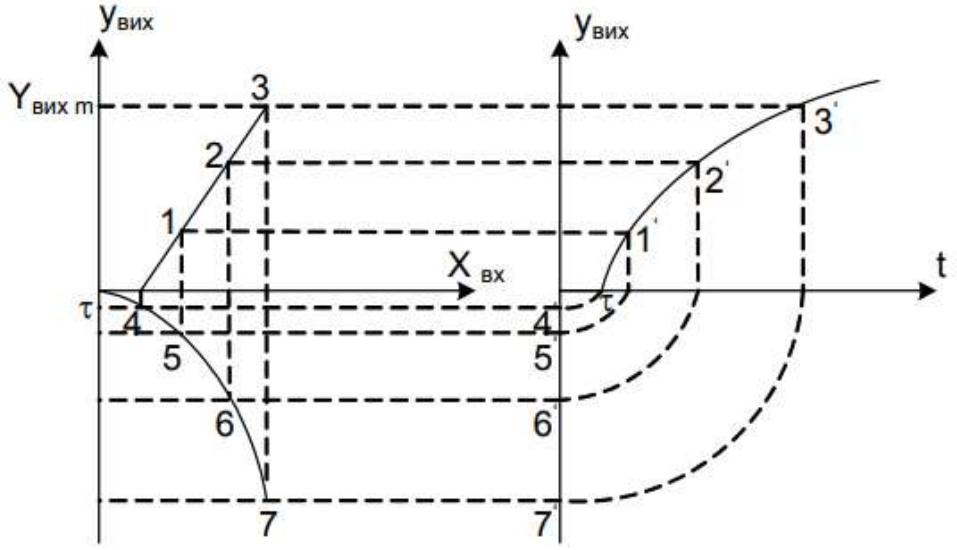


Рисунок 3.5 – До визначення поняття запізнювання

3.5 Класифікація перетворювальних пристроїв приладів

Перетворювальні пристрої приладів, або вимірювальні перетворювачі, можна класифікувати за такими основними ознаками [31]:

– фізичні величини, які підлягають перетворенню, вид вхідної та вихідної інформації як функцій часу;

– місце, що займає ППП у вимірювальному колі;

– наявність джерела енергії, що споживається перетворювачем;

– характер залежності вихідної величини від вхідної;

– властивість оборотності.

За фізичними величинами, що підлягають перетворенню, ППП, які становлять вимірювальну систему приладу, утворюють такі основні групи перетворювачів:

– електромеханічні, гідравлічні та пневматичні;

– частотні електромеханічні;

– перетворювачі аналогових величин у цифрові та цифрових у аналогові;

– оптоелектричні;

– магнітопружні тощо.

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

До перетворювачів механічних величин у електричні належать потенціометричні, тензометричні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, ємнісні, індуктивні та трансформаторні, п'єзоелектричні та механотронні перетворювачі;

До перетворювачів електричних величин у механічні – магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні та феродинамічні, індукційні перетворювачі, виконавчі двигуни постійного та змінного струму тощо.

За видом вхідної та вихідної інформації як функцій часу вимірювальні перетворювачі поділяють на:

– перетворювачі неперервної величини в неперервну, неперервної величини в дискретну, дискретної величини в неперервну, дискретної величини в дискретну;

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

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

– за характером залежності вихідної величини від вхідної:

лінійні, в яких

$$y_{вих} = kx_{вх}, \quad \text{де } x_{вх} = \text{const};$$

нелінійні, в яких $y_{вих} = f(x_{вх})$,

де $f(x_{вх})$ – нелінійна функція (наприклад,

$$y_{вих} = \sin(x_{вх}) \qquad \text{або} \qquad y_{вих} = kx_{вх}^2;$$

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

3.6 Загальні положення про похибки перетворювачів

Розрізняють абсолютні, динамічні та інструментальні похибки перетворювача за входом і за виходом [32].

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

$$\Delta x_{вх} = x^*_{вх} - x_{вх}$$

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

Абсолютна похибка ППП за виходом є різницею (рис. 3.6) між значенням вихідної величини реального перетворювача $y^*_{вих}$ в усталеному режимі його роботи (при $t=\infty$) і її істинним значенням за відсутності похибок вхідної величини ($\Delta x_{вх} = 0$):

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

Динамічна похибка вимірювального перетворювача – це різниця між значенням вихідної величини) (* вих y t в перехідному режимі і її значенням) (* увих ∞ в усталеному режимі (рис. 2.6):

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

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

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

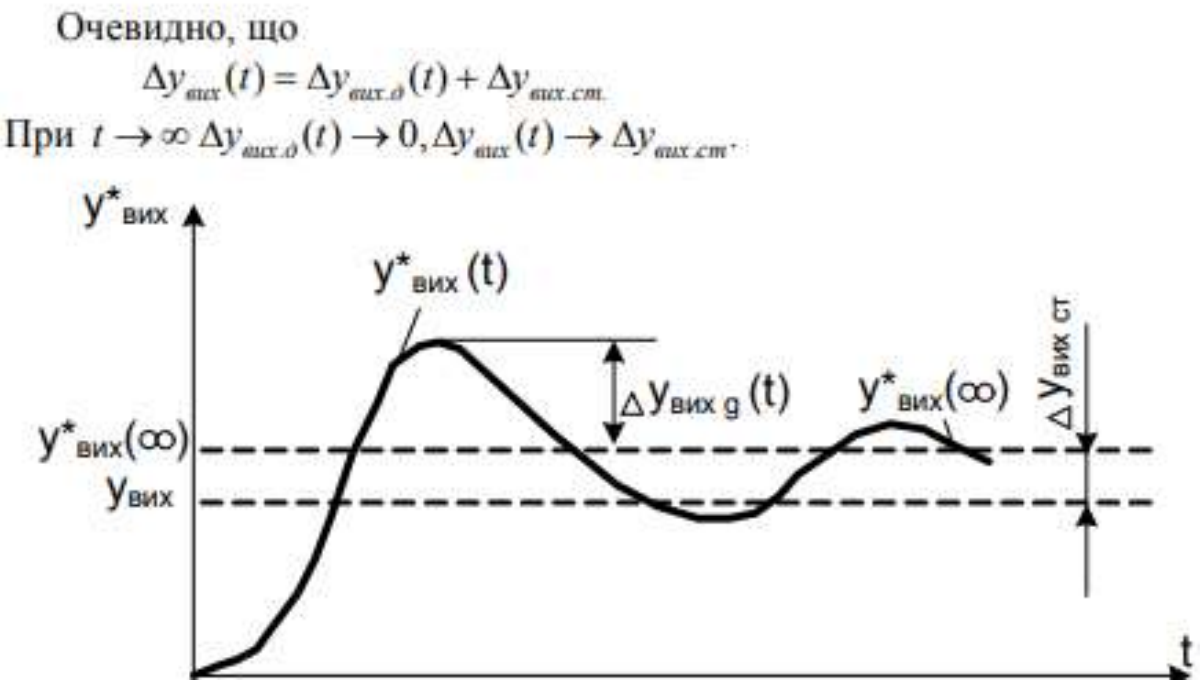


Рисунок 3.6 Визначення динамічної похибки перетворювачів

Контрольні питання до розділу 3

1. Дайте визначення чутливому елементу приладу.

2. Дайте визначення вимірювальній мережі.

3. Дайте визначення вимірювальному перетворювачу.

4. Дайте визначення первинному, проміжному, масштабному вимірювальному перетворювачу.

5. Сформулюйте основні вимоги до перетворюючих пристроїв приладів.

6. Дайте визначення математичній моделі перетворювачів.

7. Дайте визначення рівнянню динаміки перетворювачів.

8. Дайте визначення рівнянню статики перетворювачів.

9. Дайте визначення чутливості перетворювачів.

10. Дайте визначення абсолютній та відносній похибкам перетворювачів.

Розділ 4 Датчики вимірювальних систем сучасних електромеханічних комплексів

4.1 Датчики струму та напруги

У системах керування автоматизованого електроприводу (ЕП) найбільш широко застосовуються три типи датчиків струму та напруги [33]:

– резистивні;

– основані на ефекті Холла;

– трансформаторні.

Резистивні датчики – недорогі, лінійні й точні. Однак їм властиві втрати, внесені в коло виміру, відсутність гальванічної розв'язки, обмеження смуги пропускання частот, зумовлене паразитною індуктивністю більшості потужних резисторів, а також саморозігрів і термо-ЕРС при великих струмах, що знижують точність вимірювання. Низькоіндуктивні вимірювальні резистори істотно дорожчі, але можуть бути використані для вимірювання струмів у діапазоні частот до декількох мегагерц.

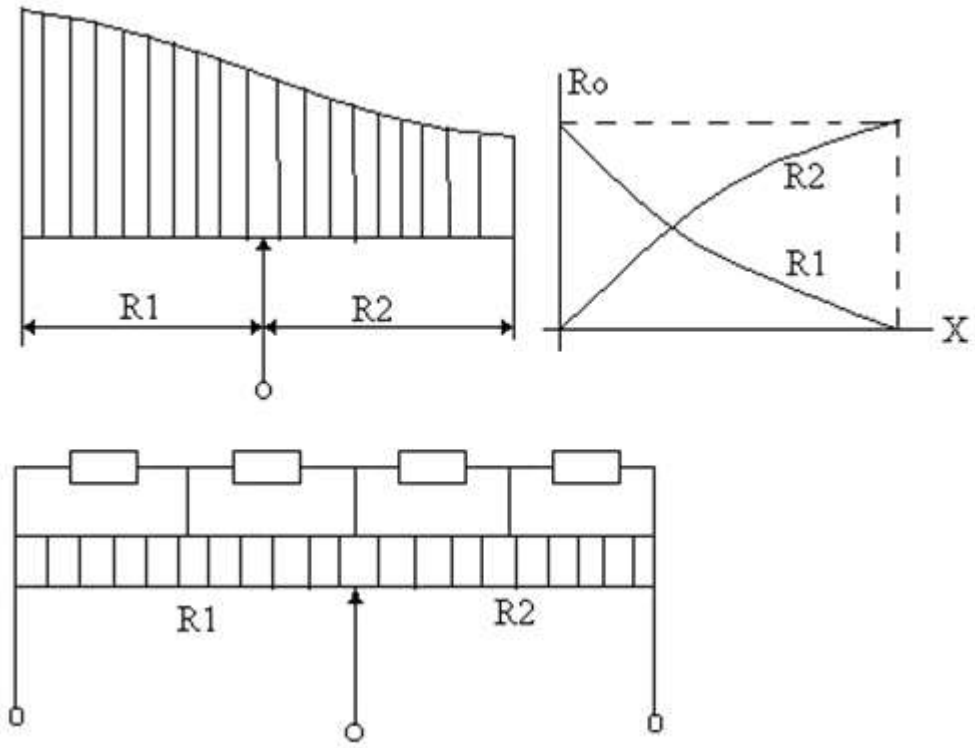


Рисунок 4.1 – Схема резистивного датчика

Конденсаторні подільники напруги застосовуються на змінному струмі у засобах вимірювання, які мають ємнісний характер вхідного опору.

Подільник побудований на двох конденсаторах з ємностями 1 C і 2 C , так само представлені опори ізоляції 1 R і 2 R конденсаторів, вплив яких проявляється на нижніх частотах.

Індуктивні подільники напруги. Особливістю таких подільників напруги є те, що їх вхідні й вихідні кола індуктивно пов'язані між собою. За принципом роботи індуктивні подільники аналогічні вимірювальним трансформаторам, але вирізняються деякими конструктивними особливостями й можуть виконуватись за трансформаторною або автотрансформаторною схемами.

Для задач вимірювання струму широкої популярності набули магніторезистивні датчики струму [34], які забезпечують точність і лінійність до 0,1...0,2 % при вимірюванні постійних і змінних (до 500 кГц) струмів до 200 А і не вносять додаткових втрат. Однак для роботи їм потрібно зовнішнє джерело живлення й відсутність зовнішніх магнітних полів.

Датчики, основані на ефекті Холла. Ефект Холла полягає в появі напруги на кінцях смужки провідника або напівпровідника, поміщеного перпендикулярно силовим лініям магнітного поля. Для міді напруга Холла становить ±24 мкВ/Тл, для напівпровідника – понад ±110 мВ/Тл (з урахуванням напрямків магнітного поля й струму), що цілком достатньо для побудови промислових датчиків струму та напруги, головними перевагами яких є відсутність внесених втрат і «природна» гальванічна розв'язка.

Існує два основні різновиди датчиків на ефекті Холла:

– прямого підсилення;

– компенсаційного.

Американський вчений Герберт Едвін Хол у 1879 р. відкрив фізичний ефект, який пояснюється на рис.4.2.

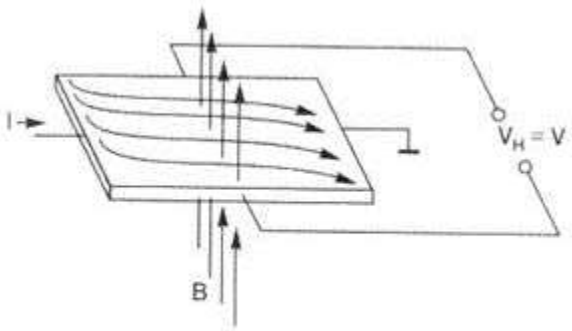


Рисунок 4.2 – Фізичне трактування ефекту Хола

Якщо через пластину пропустити струм I та поперек цієї пластини пропустити магнітне поле з індукцією B, то на поперечних гранях пластини з’явиться напруга

$$U_н = RBIsinj/d,$$

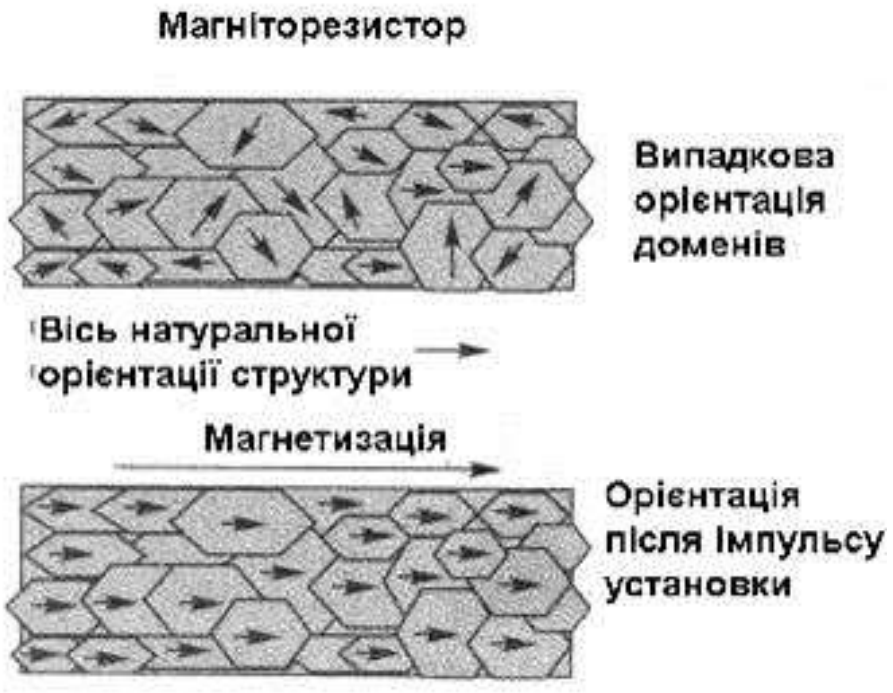
де R – коефіцієнт Хола, який залежить від матеріалу пластини, B – магнітна індукція, I – струм, j - кут нахилу магнітної індукції до струму (він дорівнює 90°, якщо індукція поперечна до струму), d – товщина пластини.

На рис.4.3 показана залежність вихідного сигналу від прикладеної до датчика напруги та магнітної індукції.

Лінійні датчики можна використовувати для вимірювання відстані, параметрів магнітного поля, кутів обертання (наприклад, як електронний компас). Але дуже важливе його використання як датчика сили струму, товщини та інших величин. Цифрові датчики Хола видають на виході логічний „0” або логічну „1”, якщо параметри магнітного поля перевищують задані. Причому поріг спрацювання може встановлюватись у мікросхемі датчика за допомогою програми.

Рисунок 4.3 – Залежність вихідного сигналу від прикладеної до датчика напруги та магнітної індукції

Ще один тип датчиків положення або близькості, що чутливі до магнітного поля – магніторезистивні датчики. У даний час вони виготовляються з пермалою, смуги якого чергуються зі смугами алюмінію (смуги Барбера). Електричний опір цих смуг залежить від прикладеного магнітного поля тому, що змінюється сумарний вектор намагнічування доменів магніторезистора (рис. 4.4) [33].



Рисисунок 4.4 – Дія доменів у магніторезисторі

Для підвищення чутливості магніторезистори формуються у вигляді мостового включення чотирьох резисторів. Основні сфери використання магніторезистивних датчиків положення або близькості: контроль швидкості обертання; контроль положення; вимірювання струму; безконтактні перемикачі; компаси та гірокомпаси, визначення дефектів.

Ємнісні датчики використовують залежність ємності плоского конденсатора від відстані між пластинами конденсатора. Як відомо, ємність плоского конденсатора визначається формулою [34]:

$$C = eS/d,$$

де C – ємність, e - діелектрична постійна ізоляції між пластинами, S – площа поверхні пластин, d – відстань між пластинами.

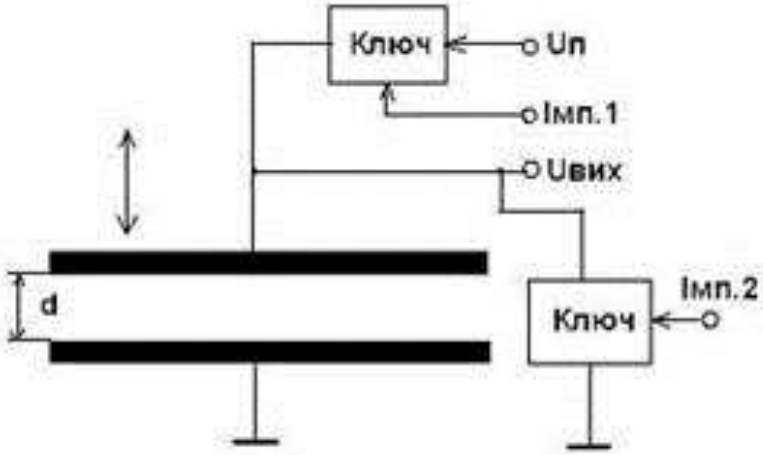


Рисунок 4.5,а – Ємнісний датчик, що реагує на відстань між пластинами

Рисунок 4.5,б – Ємнісний датчик, що реагує на зміщення пластин

В іншому варіанті, що зображений на рис.4.6 датчик ємності стає датчиком близькості [35].

Рисунок 4.6 – Ємнісний датчик близькості

Для задач вимірювання сигналів струму та напруги широкого розповсюдження набули трансформаторні датчики, які використовують у системах релейного захисту та системах контролю енергоспоживання.

Датчики на базі трансформаторів зазвичай працюють на частоті мережі (50, 60 або 400 Гц) і не можуть використовуватися в колах постійного струму. Такі датчики мають невелику вартість, порівняно з датчиками, основаними на основі ефекту Холла.

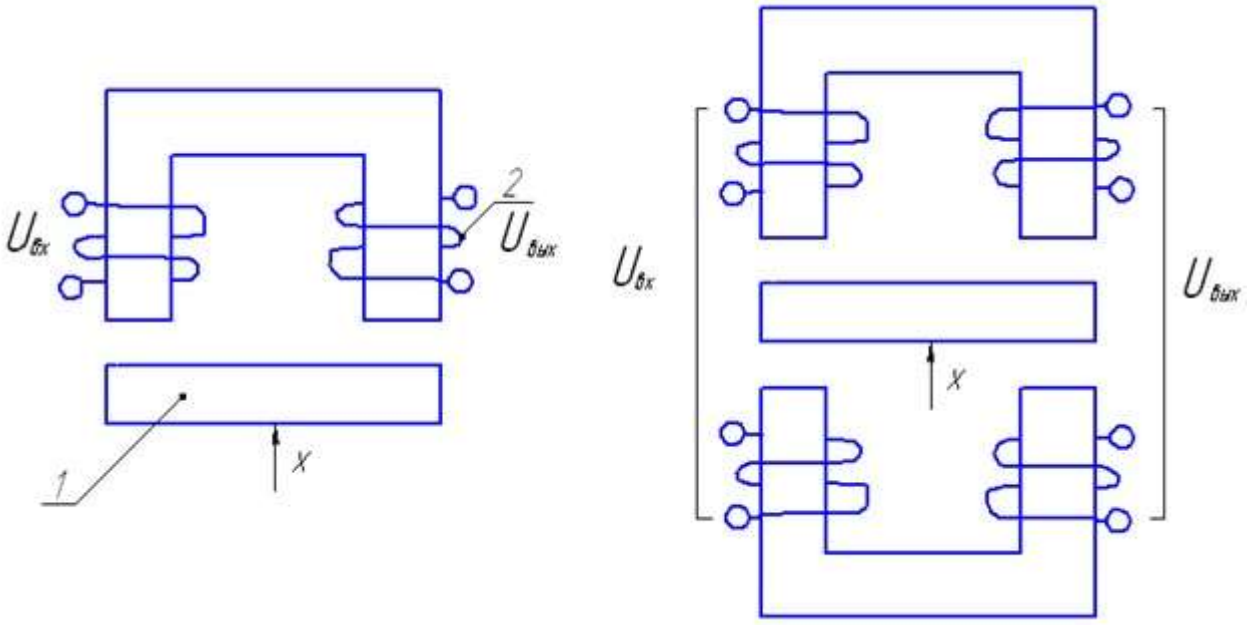


Рисунок 4.7 – Схема трасформаторних датчиків

4.2 Датчики швидкості

Тахогенераторами (ТГ) називаються електричні машини невеликої потужності, що перетворюють механічне обертання в електричний сигнал. Головна вимога, що пред'являється до тахогенераторам, полягає в лінійності вихідної характеристики - пропорційної залежності між вихідною напругою U і кутовою швидкістю обертання n [35]:

$$U = k_n = k' \frac{d\varphi}{dt}$$

де: k, k’ - коефіцієнти пропорційності; j - кут повороту.

З рівняння видно, що тахогенератори можна використовувати для вимірювання швидкості обертання і для електромеханічного диференціювання, якщо за вхідний сигнал прийняти кут повороту ротора. За родом струму тахогенератори можна розділити на ТГ змінного і ТГ постійного струму.

Асинхронний тахогенератор.

Конструкція асинхронного тахогенератора нічим не відрізняється від асинхронного виконавчого двигуна з порожнистим немагнітним ротором. Як і в ІД, одна з обмоток статора підключається до мережі змінного струму і називається обмоткою збудження ($I_В$), з іншого - генераторної обмотки (ГО) знімається вихідна напруга (рис. 4.8) [36].

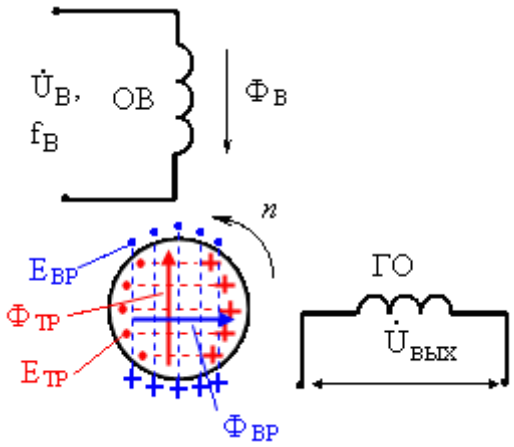


Рисунок 4.8 – Принцип дії асинхронного тахогенератора

Принцип дії асинхронного тахогенератора полягає в наступному. (Для спрощення якісного аналізу приймемо порожнистий ротор складається з кінцевого числа витків, замкнутих на торцях).

При живленні обмотки збудження змінним струмом частоти $f_В$ виникає пульсуючий магнітний потік $Ф_В$, який в обертовому роторі індукує два види ЕРС: трансформаторну ЕРС - ЕТ (показана всередині ротора) і ЕРС обертання - $Є_{ВР}$(показана зовні ротора) [36].

У контурах, перпендикулярних осі обмотки збудження, під дією трансформаторної ЕРС протікають струми і виникає потік $Ф_{ТР}$, який у відповідності з принципом Ленца спрямований зустрічно потоку обмотки збудження, однак його дія компенсується збільшенням струму збудження.

Так як вісь генераторної обмотки перпендикулярна потоку $\Phi_{ТР}$, він не буде індукувати в ній ніякої ЕРС.

У контурах, паралельних осі обмотки збудження, але тепер вже під дією ЕРС обертання теж протікають струми, які створюють свій потік ФВР. Він, пульсуючи по осі генераторної обмотки, і наводить в ній вихідну ЕРС. Якщо прийняти, що магнітний потік збудження є гармонічною функцією часу $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t)$, то миттєве значення ЕРС обертання буде $E_{вр} = \Phi_m \sin(\omega t)n$. Струм, створений цієї ЕРС, $i = E_{вр}/гр = се/гр*\Phi_m \sin(\omega t)$. (Індуктивним опір ротора можна знехтувати, оскільки він немагнітний, та до того ж виконаний з матеріалу з високим питомим опором). При відсутності насичення магнітний потік пропорційний струму Фвр = кфі = $к_ф c_е/г_р*Фm\sin(w1t)n$. Тоді миттєве значення вихідної ЕРС буде

$e = -WГd_{фвр}/dt = -WГk_ф c_е/гр*\Phi_m w1\cos(\omega t)n = E_m \sin(\omega t - 900)$. Кутова частота мережі $w_1 = 2pf$. Так як ЕРС змінюється за гармонійним законом, її діюче значення буде

$$E_г = \frac{E_м}{\sqrt{2}} = \frac{W_г}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\pi k_ф c_e}{r_p \Phi_m f_n} = k_n$$

Таким чином, величина вихідної ЕРС асинхронного тохогенератора пропорційна кутовій швидкості обертання, а її частота дорівнює частоті мережі збудження.

При підключенні навантаження вихідна напруга $U_Г$ стане менше ЕРС $E_Г$ на величину внутрішнього падіння напруги $I_г Z_г$:

$$U_г = E_г - I_г Z_г$$

У загальному випадку асинхронний тахогенератор (АТГ) являє несиметричну двофазну машину, яку можна досліджувати методом симетричних складових.

Так як $n_1 = 60f/p$, то з метою зменшення n тахогенератори проектують на велику частоту f. Правда, при цьому не зменшують p, оскільки при $p > 1$,

слабше проявляється магнітна несиметрія машини. Зазвичай p = 2. Комплексний коефіцієнт :

$$B = \frac{k^2 z_{CB}^2}{z_H r_p} + \frac{z_{CB}}{r_p}$$

де $Z_{св}$- повний опір обмотки збудження статора АТГ. Ясно, що із збільшенням r_P, коефіцієнт буде зменшуватися. Ось чому ротор АТГ виконують з матеріалу з високим питомим опором (фосфористої або марганцевої бронзи, манганина та ін). Підвищення лінійності вихідної характеристики сприяє і робота при великих опорах навантаження Z_H. До зменшення k і $Z_{СВ}$ зазвичай не вдаються, тому що перше знижує крутизну вихідний характеристики, а друге - збільшує габарити АТГ.

Похибки асинхронного тахогенератора

А м п л і т у д н о ю похибкою називається відхилення реальної характеристики U = f (n) від ідеальної (рис. 4.9). Її визначають як виражене у відсотках відношення різниці напруг ідеального (пряма 1) і реального (крива 2) тахогенераторів до номінальному напрузі ідеального $АТГ_{DU\%} = (U_{ГИ} - U_Г)/U_{ГИ.НОМ}*100$ [26].

Зменшення амплітудної похибки сприяє правильна калібрування АТГ, тобто настроювання схеми, в якій працює АТГ, на оптимальний нахил ідеальної вихідний характеристики АТГ. Так, якщо діапазон вимірюваних частот обертання невеликий, налаштування краще виконати у відповідності з рис.4.9, а. Якщо ж діапазон досить широкий, доцільно відкалібрувати АТГ по рис. 4.9, б.

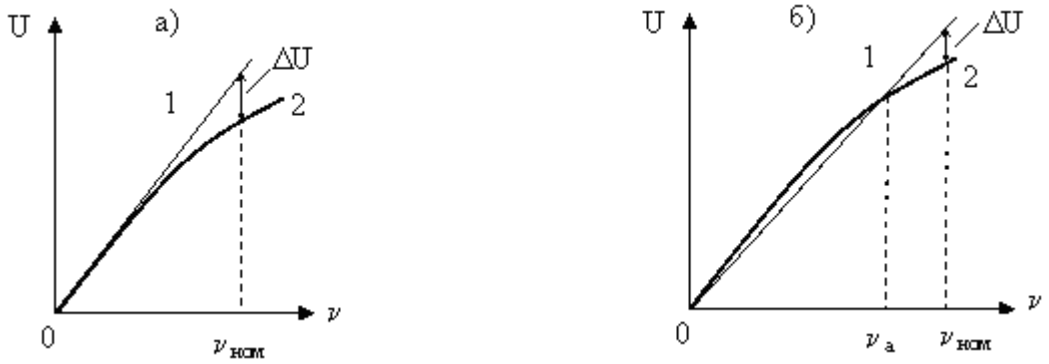
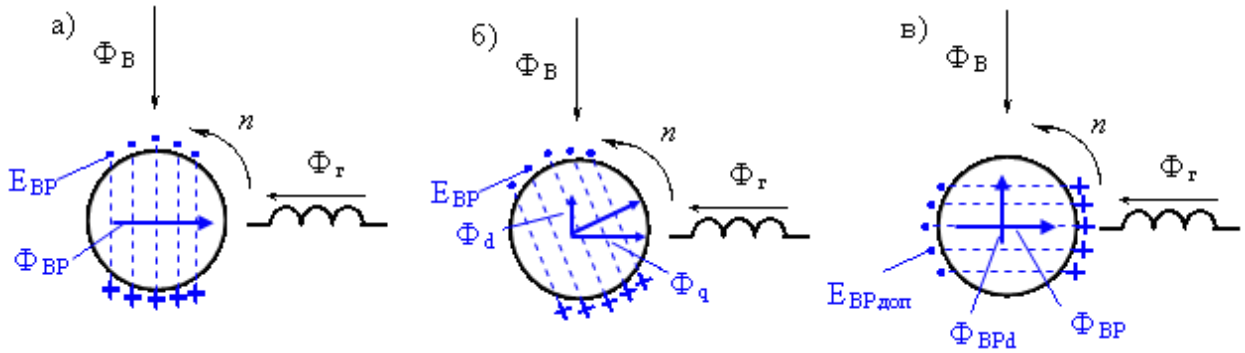


Рисунок 4.9 – Діаграми калібрування асинхронного тахогенератора при малому діапазоні швидкостей обертання а) і широкому б)

$$\nu_a = \frac{\sqrt{3}}{2}\nu_{ном}$$

Фізична природа амплітудної похибки обумовлюється рядом факторів. По-перше, падінням генераторної напруги в обмотці $I_г Z_г$ по-друге, зміною струму збудження, а отже, і магнітного потоку $Ф_в$ в результаті розмагнічуючої дії трансформаторної ЕРС ротора. Потік генераторної обмотки $Ф_г$ спрямований зустрічно потоку $Ф_{вр}$ і трохи зменшує його – це третя причина амплітудної похибки (рис. 4.10, а). Ротор хоча і володіє великим активним опір, все ж має деякий індуктивний опір, в наслідок чого потік $Ф_{вр}$ містить поздовжньо-розмагнічуючу складову $Ф_d$, яка трохи розмагнічує АТГ, що є четвертою причиною амплітудної похибки (рис. 4.10, б). І, нарешті, від потоку $Ф_{вр}$ в роторі індуктується ЕРС обертання, що створює струм і додатковий магнітний потік, що діє на зустріч потоку збудження (рис. 4.10, в). Оскільки ця додаткова ЕРС пропорційна кутовій швидкості обертання, струму збудження із збільшенням n змушений зростати, що призводить до збільшення падіння напруги в обмотці збудження зменшення потоку $Ф_В$. В цьому полягає п'ята причина амплітудної похибки АТГ [30].



Рисисунок 4.10 – Причини амплітудної похибки асинхронного тахогенератора

Ф а з о в а похибка – відхилення фази вихідної напруги від фази напруги, прийнятої за базову. Найчастіше в якості останнього беруть напругу збудження.

Фізична природа фазової похибки в основному визначається індуктивними опорами статора і особливо ротора. Її, як і амплітудну, можна зменшити шляхом відповідного вибору характеру навантаження (рис. 4.11).

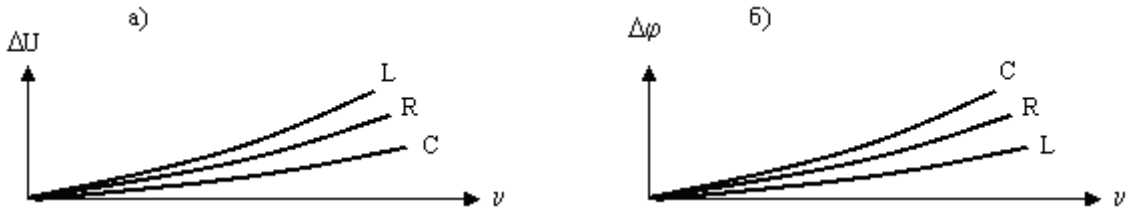


Рисунок 4.11 – Залежність амплітудної і фазової похибки АТГ від швидкості обертання при різному характері навантаження

На рис. 4.11 побудовані залежності амплітудної і фазової похибки в функції частоти обертання при різному характері навантаження (R - чисто активна, L - чисто індуктивна, C - чисто ємнісний) для АТГ відкаліброваного згідно рис. 4.9, а.

З рис. 4.11 видно, що не можна одночасно знизити і амплітудну і фазову похибки. У той же час видно, що, підключаючи паралельно генераторної обмотці різні опору (здійснюючи компаундує), можна істотно зменшити одну з них. Зазвичай ту, яка найбільш суттєва для конкретної схеми роботи АТГ [30].

На рис. 4.12 побудовані спрощені векторні діаграми асинхронного тахогенератора, що ілюструють вплив характеру навантаження на величину фазової похибки. Вектор струму збудження показаний без основної і компенсуючої складових. Кут jp обумовлений співвідношенням активного і реактивного опору ротора.

Досвід і рис. 4.11 показують, що амплітудна і фазова похибки порівняно невеликі при малих n. Тому доцільно обмежити діапазони вимірюваних відносних кутових швидкостей обертання значеннями 0÷0,25 для АТГ високого класу точності і 0÷0,7 для інших АТГ.

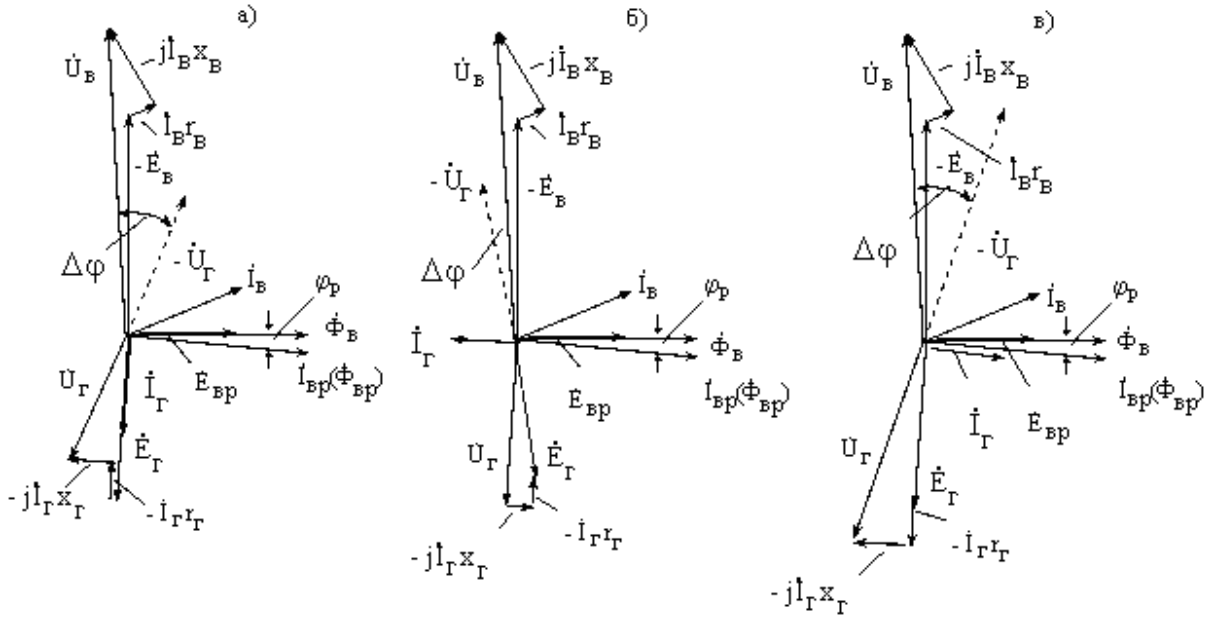


Рисунок 4.12 – Спрощені векторні діаграми АТГ при різних навантаженнях:
а) $Z_Н = R$ б) $Z_Н = j\omega L$ в) $Z_Н = -j1/\omega C$

Н у л ь о в и й с и г н а л – напруга на генераторної обмотці при нерухомому роторі. Нульовий сигнал U_0 не залишається постійним при

повороті ротора. Він містить дві складові: постійну й змінну (рис. 8.6) Постійна складова обумовлюється: а) неточним зрушенням обмоток на 90 ел. град; б) наявністю короткозамкнених контурів в сердечниках і обмотках; в) неоднаковою магнітною провідністю вздовж і поперек прокату; г) нерівномірним повітряним зазором; д) наявністю потоків розсіяння та іншими причинами, провідними до магнітної зв'язку двох, здавалося б, перпендикулярних обмоток. У більшості АТГ вона досягає 25÷100 мВ. Змінна складова зумовлена неоднаковою товщиною стінок в різних частинах порожнього ротора, що призводить до різниці активних опорів елементарних контурів, до різниці струмів і потоків цих контурів. Вона складає 3÷7 мВ. Для боротьби з постійної складової нульового сигналу, обмотки часто розміщують на різних статорах: одну на внутрішньому, іншу на зовнішньому, а потім при складанні АТГ внутрішній статор повертають до тих пір, поки нульовий сигнал не стане мінімальним. У цьому положенні статор фіксують.

Для боротьби зі змінною складовою ротор калібрують, тобто видаляють частину металу, домагаючись його максимальної електричної симетрії [35].

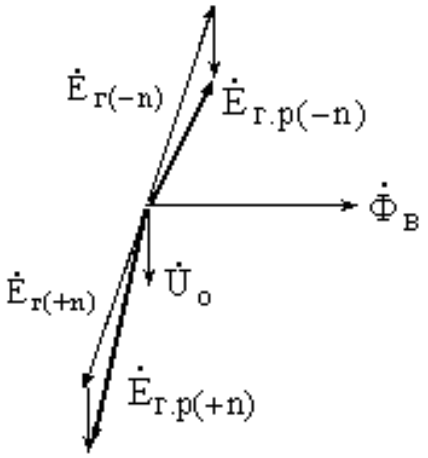


Рисунок 4.13 – Асиметрія вихідної напруги АТГ

А з і м е т р і я вихідної напруги - нерівність напруг АТГ при обертанні з однаковою кутовою швидкістю в протилежних напрямках: U+n / U-n.

Особливо яскраво вона проявляється на малих частотах обертання. Головна причина несиметрії полягає в наявності залишкової ЕРС (нульового сигналу). Справді, при зміні напряму обертання фаза основної ЕРС генераторної обмотки $E_г$ змінюється на 180°, тоді як фаза нульового сигналу U_o залишається постійною (рис. 4.13). В результаті результуюча ЕРС вихідний обмотки змінюється за величиною: Ег.р(+n) / Ег.р(-n). Найефективніший спосіб боротьби з асиметрією вихідної напруги є зменшення нульового сигналу.

Т е м п е р а т у р н а похибка. При зміні температури навколишнього середовища, при нагріванні АТГ у процесі роботи змінюються активні опори обмоток статора і ротора. Це призводить до додаткового відхилення вихідної характеристики від ідеальної, до появи додаткових амплітудних і фазових похибок. Найбільший вплив у цьому відношенні робить зміна опору обмотки збудження. Тому часто послідовно з нею включають терморезистори, стабілізуючі повний опір цього кола [36].

З метою зменшення впливу температури на опір ротора, його виготовляють з матеріалу з низьким температурним коефіцієнтом (манганина константана та ін.).

Тахогенератори постійного струму

Рівень розвитку матеріальної культури людського суспільства в першу чергу визначається створенням і використанням джерел енергії. Застосування пара, а в останні 100 років електрики, вчинила технічну революцію в промисловості і зробило вирішальний вплив на розвиток соціальних відносин. В даний час в найбільш розвинених країнах на одну людину припадає до 10 кВт всіх видів енергії. Це приблизно в 100 разів більше, ніж м'язова потужність людини, яка ще 200 років тому була основною в промисловості і сільському господарстві. З повною підставою можна вважати, що сьогодні технічний і культурний рівень розвитку Держави визначається кількістю електроенергії, що виробляється на душу населення.

Основою для створення електричних машин і трансформаторів з'явився відкритий М. Фарадеєм закон електромагнітної індукції. Початок практичного застосування електричних машин було покладено російським академіком Б. С. Якобі, який у 1834 р. створив конструкцію електричної машини, що з'явилася прототипом сучасного електродвигуна. Практичне застосування трансформаторів почалося в 1876 р., коли російський вчений П. Н. Яблочков вперше застосував трансформатори для живлення винайдених їм електричних свічок. Широкому застосуванню електричних машин в промисловості сприяло винахід російського інженера М. О. Доліво-Добровольського (1889) трифазного асинхронного двигуна, що відрізняється простотою конструкції і високою надійністю. До початку XX ст. були створені майже всі види сучасних електричних машин і розроблено основи їх теорії. Починаючи з цього часу швидкими темпами відбувається електрифікація промисловості і транспорту [36].

Електричні машини малої потужності (мікромашини), застосовуються в системах і пристроях автоматики і обчислювальної техніки в якості функціональних елементів. Всі електромашинні елементи автоматики поділяються на три групи: виконавчі двигуни, електромашинні підсилювачі та інформаційні машини. Виконавчі двигуни здійснюють перетворення електричного сигналу в механічне переміщення, вони можуть бути асинхронними, постійного струму і кроковими. Електромашинні підсилювачі використовуються для підсилення потужності електричних сигналів. Інформаційні машини включають в себе тахогенератори, сельсини, магнесини та обертові трансформатори. Ці машини служать для перетворення механічних величин (кута повороту, частоти обертання або прискорення) в електричний сигнал або для передачі механічного переміщення на відстань [36].

Тахогенератор постійного струму – це машина постійного струму з незалежним збудженням або порушенням постійними магнітами, що працює

в генераторному режимі. По конструкції він майже не відрізняється від машин постійного струму.

Тахогенератори постійного струму служать для вимірювання частоти обертання за значенням вихідної напруги, а також для отримання електричних сигналів, пропорційних частоті обертання вала в схемах автоматичного регулювання.

Основними вимогами, що пред'являються до тахогенераторам, є: а) лінійність вихідної характеристики; б) більша крутизна вихідний характеристики; в) малий вплив на вихідну характеристику зміни температури навколишнього середовища і навантаження; г) мінімум пульсацій напруги на колекторі [36].

На. рис. 4.12 показано принципові схеми тахогенераторів постійного струму з електромагнітним збудженням (а) і порушенням постійними магнітами (б). У разі електромагнітного збудження обмотку збудження ОВ підключають до джерела постійного струму (рис. 4.12, а). Тахогенератор збуджується і якщо його якір привести в обертання з частотою n, то на виході генератора з'явиться постійна напруга $U_{вих}$. Рівняння вихідної характеристики тахогенератора має вигляд:

$$U_{вих} = \frac{c_e \Phi_s n}{1 + r_a/R_н} - \frac{\Delta U_щ}{1 + r_a/R_н}$$

де r_a – опір обмотки якоря, Ом; $R_н$ – внутрішній опір приладу, підключеного до тахогенератору, Ом.

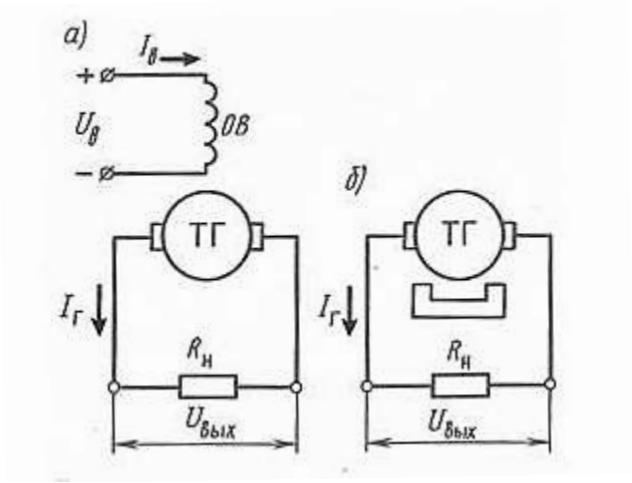


Рисунок 4.14 – Принципові схеми тахогенераторів постійного струму з електромагнітним збудженням (а) і порушенням постійними магнітами (б).

Якщо знехтувати падінням напруги у щітковому контакті $\Delta U_{щ}$, то:

$$U_{вих} = \frac{c_e \Phi_s n}{(1 + \frac{r_a}{R_н})} = c_U n$$

З (2) випливає, що чим більше опір приладу $R_н$ тим більше крутизна вихідний характеристики C_u. Найбільша крутизна у вихідний характеристики, що відповідає режиму холостого ходу тахогенератора, коли обмотка якоря розімкнути ($R_Н = \infty$).

Похибки тахогенераторів постійного струму

З ростом струму навантаження (зменшенням $R_Н$) крутизна вихідний характеристики зменшується (рис. 4.14, а). У сучасних тахогенераторsв постійного струму C_u = (6÷260).103В/(об/хв), що перевищує крутизну асинхронних тахогенераторів [30].

Вихідна характеристика тахогенератора постійного струму - пряма лінія. Однак досвід показує, що вихідна характеристика прямолінійна тільки в початковій частині (при малих відносних частотах обертання), а з ростом частоти обертання вона стає криволінійною (рис. 4.15, а). Криволінійність характеристики посилюється при зменшенні опору навантаження $R_Н$ і збільшенні частоти обертання n. Це пояснюється

елементом дії реакції якоря в тахогенераторі. Для зменшення кривої вихідної характеристики не слід використовувати тахогенератор на його граничних частотах обертання і застосовувати в якості навантаження прилади з малим внутрішнім опором.

В реальних умовах існує падіння напруги у щітковому контакті $\Delta U_{щ}$, тому вихідна характеристика тахогенератора виходить не з початку осей координат, а з точки на осі ординат, віддаленій від початку координат на

$$U_{щ} = \frac{-\Delta U_{щ}}{\left(1 + \frac{r_a}{R_н}\right)}$$

Це призводить до появи у тахогенераторів постійного струму зони нечутливості $\varepsilon = \pm n_{min}$, в межах якої він не створює на виході напруги (рис. 4.15, б) [30].

Для зменшення зони нечутливості в тахогенераторах застосовують щітки з невеликим значенням $\Delta U_{щ}$, тобто з малим опором (мідно-графітні або срібно-графітні). У тахогенераторах високої точності (прецизійних) використовують щітки з срібними або золотими напайками.

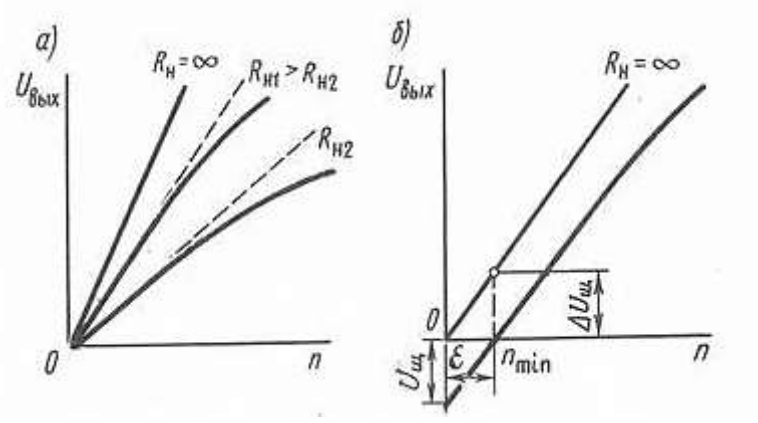


Рисунок 4.15 – Вихідні характеристики тахогенераторів постійного струму

У тахогенераторах постійного струму технологічна неточність установки щіток на геометричній нейтралі викликає ще один вид похибки – асиметрію вихідної напруги. Вона полягає в тому, що величина вихідної напруги різна при обертанні якоря з однаковою частотою, але в протилежних

напрямках. При зсуві щіток з геометричної нейтралі виникає поздовжня складова потоку якоря, яка при одному напрямку обертання збігається з потоком збудження, а при іншому – протилежна йому. Отже, результуючий потік машини при обох напрямках обертання буде різним, при цьому різними будуть е. р. с., індуковані в якорі [30].

Асиметрію вихідної напруги обчислюють як відношення різниці вихідних напруг при обертанні якоря з номінальною частотою в обох напрямках до півсуми цих напруг. В залежності від класу точності тахогенератора швидкісна амплітудна похибка при номінальній частоті обертання становить ±(0,05-3)%, а помилка асиметрії дорівнює ±(1-3)%.

Джерелом похибки є також мінливість магнітного потоку обмотки збудження $Ф_в$. При електромагнітному порушенні тахогенератора причиною цього може бути коливання напруги $U_В$, що підводиться до обмотки збудження, нагрів цієї обмотки [36].

В обох випадках змінюється струм збудження ІВ що веде до зміни потоку $Ф_в$. Для зменшення можливих коливань потоку Ф. магнітну систему тахогенератора виконують з сильним магнітним насиченням, тобто робочу точку 1 на кривій намагнічування приймають за «коліном» насичення магнітної системи. З побудов рис. 8.9, а видно, що зміна струму збудження $I_в$ на $ΔI_{в1}$ в зоні точки 1 викликає зміна потоку збудження на ΔФв1, значення змін тут набагато менше, ніж в зоні точки 2, що лежить на прямолінійній ділянці кривої намагнічування, розташованому до «племени» насичення (ΔФв1 <<ΔФв2) [31].

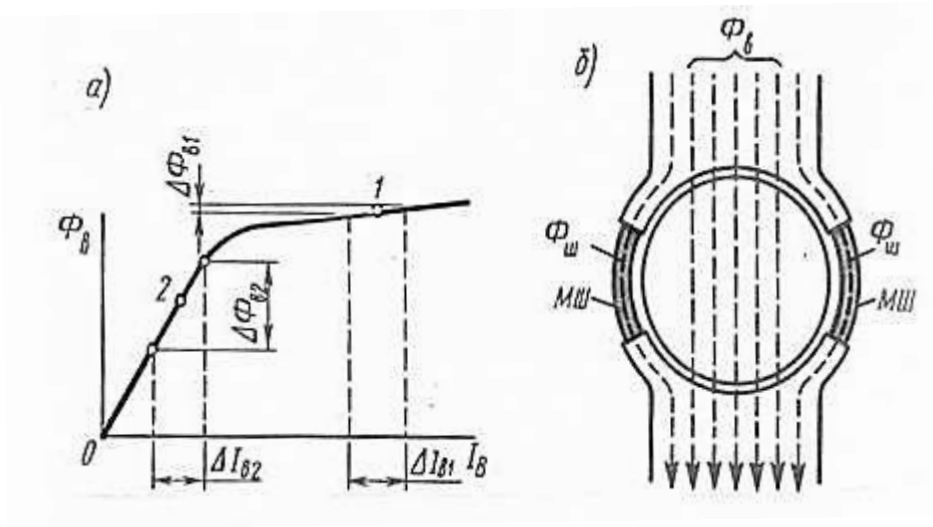


Рисунок 4.16 – Крива намагнічування тахогенератора постійного струму і магнітопровід з магнітними шунтами.

Сильне магнітне насичення магнітної ланцюга тахогенератора не завжди доцільно, тому що збільшується обсяг обмотки збудження, а отже, габаритні розміри тахогенератора. У тахогенераторах з ненасиченою магнітною системою для обмеження коливань потоку збудження Ф послідовно в ланцюг обмотки збудження включають терморезистор, що компенсує зміну опору обмотки при коливаннях температури, або застосовують магнітні шунти МШ (рис. 4.16,б) виготовлені зі сплаву, що змінює свій магнітний опір при зміні температури нагріву. Наприклад, при нагріванні обмотки збудження її опір збільшується, струм $I_в$ і потік $Ф_в$ зменшуються. Але при цьому магнітний опір шунтів збільшується, що зменшує потік $Ф_ш$ через шунти і збільшує потік $Ф_в$ через полюс і якір на величину, що компенсує його зменшення від зміни струму збудження. При зниженні температури процеси йдуть в зворотньому напрямку. У результаті відбуваються лише незначні коливання потоку збудження. Всі причини, що викликають відхилення вихідної характеристики тахогенератора від прямолінійної, ведуть до амплітудної похибки. Тахогенератори постійного струму мають амплітудну похибка від 0,5 до 3% [30].

У тахогенераторах постійного струму можлива пульсація вихідної напруги, обумовлена рядом причин: зубчастою поверхнею сердечника якоря; нерівномірністю повітряного зазору або неоднаковою магнітною провідністю сердечника якоря з різних радіальних напрямках; вібрацією щіток і замиканням секцій обмотки якоря в процесі комутації; невеликою кількістю секцій в обмотці якоря із-за малих габаритних розмірів машини Пульсації напруги можуть вносити перешкоди в роботу автоматичних пристроїв, елементом яких є тахогенератори. Пульсації напруги можна послабити за рахунок більш якісної технології виготовлення тахогенератора із застосуванням віялового складання листів сердечника якоря (листи укладають у пакет зі зсувом на одно зубцевий поділ), а також підключенням згладжуючого фільтра на вихід тахогенератора. Проте повністю позбавитися від пульсацій не вдається. Амплітуди пульсації вихідної напруги тахогенераторів постійного струму складають 0.1-3 % від середнього значення вихідної напруги [30].

На роботу тахогенератора впливають також пульсації вихідної напруги, обумовлені: 1) зубчастою будовою якоря (зубцеві пульсації); 2) зміною магнітного потоку за час одного обороту внаслідок еліптичності, ексцентриситету якоря або магнітної анізотропії його матеріалу (якірні пульсації); 3) періодичною зміною числа секцій в паралельних гілках якоря; особливо при малому числі колекторних пластин; 4) вібрацією щіток і замиканням на коротко частин секцій.

Тахогенератори постійного струму в схемах автоматики.

Застосування тахогенераторів постійного струму в різних системах управління пояснюється тим, що вхідним сигналом для більшості регуляторів в схемах автоматики є напруга постійного струму; тахометри з рівномірними шкалами є вольтметрами магнітоелектричної системи і по суті вимірюють напругу постійного струму, пропорційний частоті обертання [30].

У замкнутій системі регулювання тахогенератори є основною ланкою контуру зворотного зв'язку по частоті обертання. Часто вважають, що

тахогенератор - це без інерційналанка або (при наявності RC-фільтра для згладжування пульсацій підвищеної частоти) інерційна ланка першого порядку з невеликою постійною часу, яка визначається RC-ланкою фільтра.

Більш глибокі дослідження, однак, показують, що з урахуванням ΔU і люфтів в рухомий передачі (муфти, зубчасті пари) вузол тахогенератора стає нелінійною ланкою, що викликає автоколивання системи управління. При цьому найбільш шкідливі низькочастотні пульсації напруги на виході вузла тахогенератора більшою мірою залежать від органічних недоліків застосовуваних передач, ніж від власне тахогенератора як електричної машини.

В системі автоматичного управління під тахогенератором (ТГ) прийнято розуміти комплекс пристроїв або вузол між валом двигуна і входом підсилювача. В приводах з тахогенераторами цей вузол включає в себе пристрій зчленування (муфту, зубчасту передачу), власне тахогенератор, проводку до панелі керування, а іноді також вихідний трансформатор, фільтр і потенціометр.

На рис. 4.17 в якості прикладу наведена найпростіша структурна схема керованого електроприводу з зворотним зв'язком по частоті обертання. Схема управління призначена для того, щоб забезпечити частоту обертання механізму М пропорційної незмінним еталонного напруги або змінювати її пропорційно напрузі програмного пристрою. Для цього напруга у пристрої порівняння зіставляється з напругою джерела еталонної напруги або програмного пристрою і їх різниця подається на підсилювач, де вона посилюється, як правило, двома послідовними каскадами - попереднім підсилювачем і підсилювачем потужності, до якого підключений двигун Д. Неважко помітити, що чим вище коефіцієнт посилення по напрузі і потужності підсилювачів, тим меншими повинні бути різниця напруг і потужність, що віддається ТГ, які необхідно подавати на вхід У, щоб забезпечити задану частоту обертання, і тим точніше буде витримуватися пропорційністю між частотою обертання і напругою ПУ.

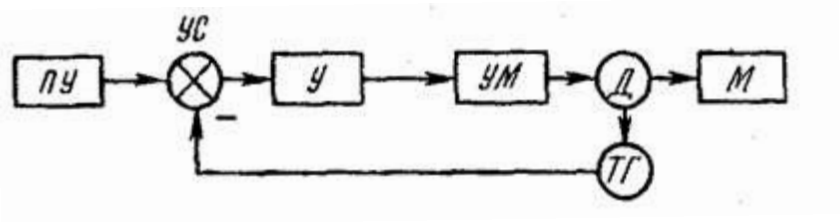


Рисунок 4.17 – Структурна схема керованого електроприводу

Переваги і недоліки. Переваги тахогенераторів постійного струму в порівнянні з асинхронними тахогенераторами: менші габаритні розміри і маса (у 2-3 рази) при більшій вихідний потужності; відсутність фазової похибки; можливе порушення постійними магнітами, що дозволяє обійтися без джерела живлення для ланцюга збудження.

Поряд з цим тахогенератори постійного струму мають недоліки, які обмежують їх застосування: складність конструкції, високу вартість, наявність ковзного контакту між щітками і колектором, що призводить до зниження надійності тахогенератора і до нестабільності вихідної характеристики; наявність зони нечутливості; пульсація вихідної напруги; перешкоди радіоприйому, для придушення яких у деяких випадках доводиться застосовувати спеціальні заходи.

Для придушення електромагнітних випромінювань застосовують екранування двигуна. В якості екрану використовують заземлений корпус двигуна. Якщо у підшипниковому щиті з боку колектора є вікна, то їх закривають металевою сіткою, з'єднаною з заземленим корпусом двигуна. Якщо корпус двигуна або його передній підшипниковий щит(зі сторони колектора) виготовлені з пластмаси, то неметалеву частину двигуна закривають сіткою і заземлюють.

Для придушення радіоперешкод, що проникають в електромережу, застосовують симетрування обмоток і включення фільтрів. Симетрування полягає в тому, що кожну обмотку, що включається послідовно в ланцюг якоря (обмотку збудження, обмотку додаткових полюсів тощо), поділяють на

дві рівні частини і приєднують симетрично обмотці якоря, підключаючи до щіток різної полярності. В якості фільтрів використовують конденсатори, включені між кожним токонесущим дротом і заземленим корпусом двигуна. Значення ємності конденсаторів підбирають дослідним шляхом. Конденсатори повинні бути розраховані на робочу напругу двигуна. Переважніше застосовувати прохідні конденсатори типу КБП, у яких один із затисків металевий корпус, прикріплюється безпосередньо до статора двигуна який заземляють разом з ним. Часто конденсатори фільтра розташовують у коробці виводів двигуна [30].

Таким чином, будь-який вид тахогенератора має свої переваги і недоліки. Тому при виборі тахогенератора необхідно виходити з конкретних умов його роботи і вимог, що пред'являються до тахогенератору з боку автоматичного пристрою, для якого він призначений.

Широке застосування отримали тахогенератори постійного струму, що порушуються постійними магнітами. Ці тахогенератори не мають обмотки збудження, і тому вони простіші за конструкцією і мають менші габарити.

Цифрові датчики швидкості

В сучасних системах АЕП з великими діапазонами регулювання швидкості і високими вимогами до її стабілізації точність ТГ може виявитися недостатньою. Для таких систем використовуються цифрові датчики швидкості (ЦДШ). Функціонально в ЦДШ можна виділити дві основні частини: імпульсний перетворювач швидкості – датчик імпульсів ДІ, перетворює кутову швидкість вала в імпульси з частотою f, пропорційною швидкості, і кодовий перетворювач-лічильник імпульсів СІ, що формує на інтервалі вимірювання Т цифровой код An вихідної величини датчика швидкості (рис. 4.18).

Датчик імпульсів може бути виконаний на основі индуктосіна або фотоелектричного кодового диска. У будь-якому варіанті датчик імпульсів виробляє дві серії імпульсів, зрушених по фазі які використовуються для визначення кутової швидкості та її знака. На рис. 4.19 зображений кодовий

диск фотоелектричного датчика імпульсів. На двох доріжках розташовані щілини, що пропускають світло. Світло від джерел ИС1 і ИС2 через щілини попадає на фотодіоди BL1 і BL2, які при цьому відкриті і пропускають струм. Коли щілину виходить з променя світла, фотодіоди замикають ланцюг. При обертанні диска з кутовою швидкістю з BL1 і BL2 дають чергування максимального і мінімального сигналів з частотою.

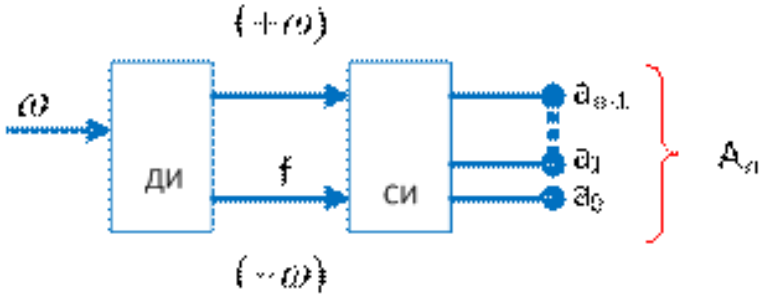


Рисунок 4.18 – Структурна схема цифрового датчика швидкості

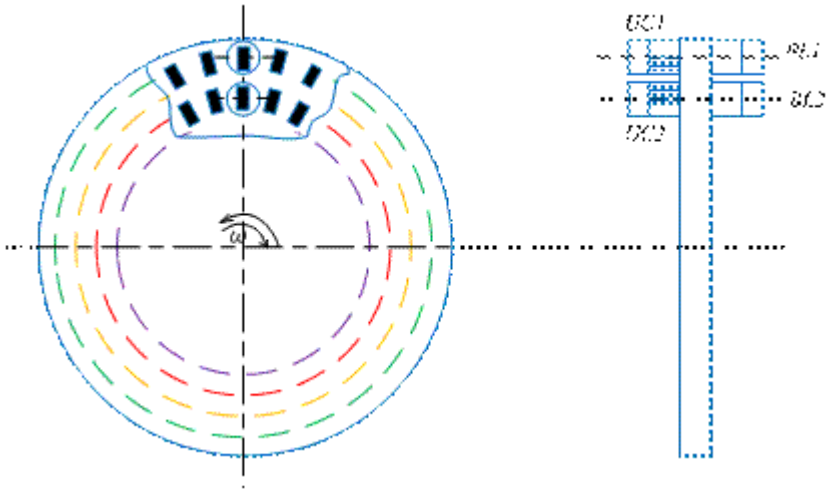


Рисунок 4.19 – Кодовий диск фотоелектричного датчика імпульсів

$$f_{д.н} = \frac{\omega}{2\pi} N_{д.и}$$

де $N_{д.и.}$ – імпульсна ємність кодового диска – число імпульсів на один оборот диска.

Струмовий сигнал фотодіода змінюється за формою та амплітудою при зміні швидкості обертання. Тому для отримання стабільних сигналів з незмінними амплітудою і тривалістю до складу датчика імпульсів входить вузол формування вихідних імпульсів (рис. 4.20). В підсилювачі В струмовий сигнал фотодіода BL1 посилюється і симетрується по полярності Uy1. Підсилювач, зібраний на транзисторах VT1 і VT2 і працює з використанням позитивного зв'язку в релейному режимі, дає на виході прямокутні імпульси U1 з постійною амплітудою, рівною U_n, але зі змінною тривалістю. Вихідний імпульс з незмінними і амплітудою і тривалістю t формується з допомогою одновібратора. Діаграма роботи описаного вузла наведена на рис. 4.21. Аналогічний вузол є і для імпульсів другої доріжки кодового диска з фотодіодом BL2. Для кожного напряму обертання в датчику імпульсів є свій вихідний канал [30].

Виділення імпульсів на каналах позитивної швидкості (напрям «вперед») або негативної швидкості (напрям «назад») здійснюється логічним вузлом (рис. 4.22). На першому вихідному каналі імпульси з'являються при такому напрямку обертання, при якому сигнал U2 випереджає по фазі на сигнал U1, і елемент збігу И1 відкритий для імпульсів. При іншому напрямку обертання, коли U2 відстає по фазі від U1,

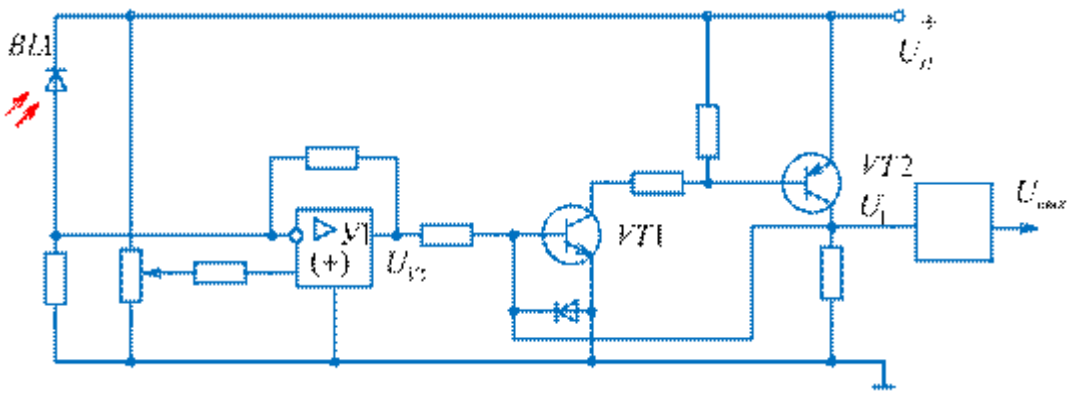


Рисунок 4.20 – Схема датчика імпульсів

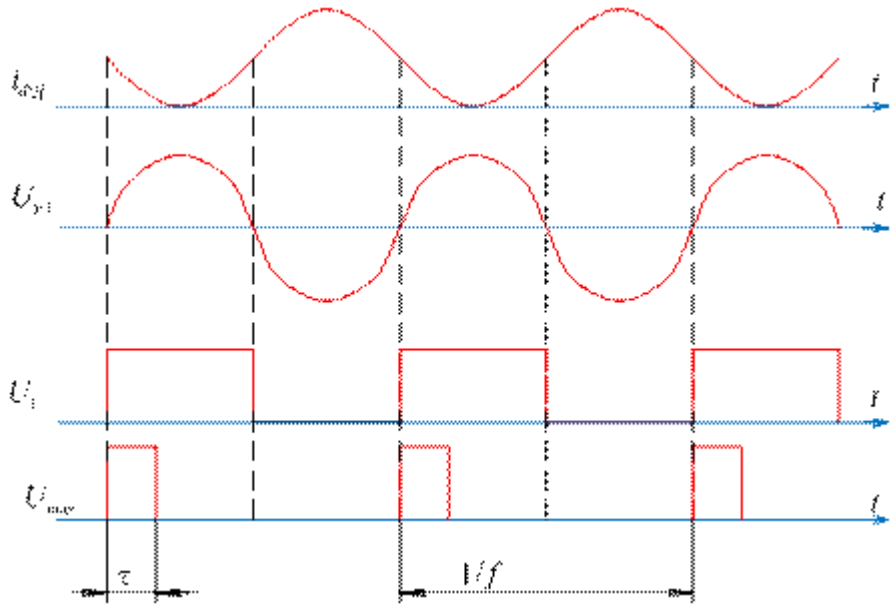


Рисунок 4.21 – Діаграма формування вихідного сигналу датчика імпульсів

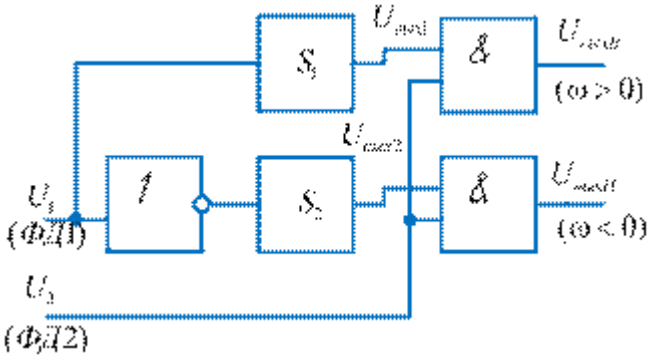


Рисунок 4.22 – Схема розділення за часом імпульсів двох каналів в датчику швидкості

Формування цифрового коду на виході датчика швидкості за допомогою лічильника може виконуватися двояко. На заданому періоді вимірювання T лічильник може підраховувати кількість імпульсів, яка буде характеризувати середнє значення швидкості [30]:

$$N = f_{д.и.}T = \frac{\omega}{2\pi}N_{д.и}T$$

Так як молодшому розряду датчика відповідає один імпульс, то роздільна здатність ЦДШ становить N : 1, а точність вимірювання δ = 1/N . Очевидно, дискретність по швидкості датчика, про/с, визначиться величиною:

$$\Delta n_0 = 1/(N_{д.и}T)$$

Таким чином, точність ЦДШ тим вище, чим більше вимірювана швидкість і період вимірювання.

Збільшення значення Т для зменшення похибки при низьких швидкостях небажано, оскільки при цьому зростає дискретність часу і збільшується розбіжність між середнім і миттєвим значенням швидкості, що може утруднити використання ЦДШ в системах управління.

Інший варіант формування цифрового коду швидкості полягає у визначенні інтервалу часу між двома імпульсами шляхом підрахунку числа високочастотних опорних імпульсів, які розташовуються на вимірюваному інтервалі. Даний спосіб має, навпаки, максимальну роздільну здатність на найнижчих швидкостях, коли період прямування імпульсів максимальний і містить найбільшу кількість опорних імпульсів. Однак висока точність датчика при низьких швидкостях відноситься лише до середнього за вимірюваний інтервал значенням швидкості. При підвищенні швидкості точність даного ЦДШ знижується.

Розглянуті варіанти ЦДШ забезпечують високу точність вимірювання швидкості, і тим більшу, чим триваліший період вимірювання. Однак даний період вимірювання вносить в систему управління з ЦДШ дискретність часу, яка вносить спотворення в роботу високодинамічних систем. Тому для зниження дискретності часу у швидкодіючих системах з управлінням по інтегралу сигналу неузгодженості інтегрування різниці швидкостей виконується підрахунком різниці безпосередньо числа імпульсів з задаючого пристрою і з датчика імпульсів з допомогою реверсивного лічильника.

4.3 Датчики лінійних і кутових переміщень

Абсолютний і інкрементальний енкодер.

Енкодер або перетворювач кутових переміщень – пристрій, призначений для перетворення кута повороту обертового об'єкта (валу) в електричні сигнали, що дозволяють визначити кут його повороту.

Широко застосовуються в промисловості.

Енкодери поділяються на інкрементальні і абсолютні, які можуть досягати дуже високого дозволу [31].

Інкрементальний енкодер видає за один оборот певну кількість імпульсів. А абсолютні енкодери дозволяють в будь-який момент часу знати поточний кут повороту осі, у тому числі і після зникнення і відновлення живлення. А багатооборотні абсолютні енкодери, крім того, також підраховують і запам'ятовують кількість повних обертів осі. Енкодери можуть бути як оптичні, резисторні, так і магнітні і можуть працювати через шинні інтерфейси або промислову мережу. Перетворювачі кут-код практично повністю витіснили застосування сельсинов [32].

Інкрементальні енкодери.

ІнкрементальнІ енкодери призначені для визначення кута повороту обертових об'єктів. Вони генерують послідовний імпульсний цифровий код, що містить інформацію щодо кута повороту об'єкта. Якщо вал зупиняється, то зупиняється і передача імпульсів. Основним робочим параметром датчика є кількість імпульсів за один оборот. Миттєву величину кута повороту об'єкта визначають шляхом підрахунку імпульсів від старту. Для обчислення кутової швидкості об'єкта процесор в тахометрі виконує диференціювання кількості імпульсів у часі, таким чином показуючи відразу величину швидкості, тобто число оборотів в хвилину. Вихідний сигнал має два канали, в яких ідентичні послідовності імпульсів зсунуті на 90° відносно один одного (парафазні імпульси), що дозволяє визначати напрям обертання. Є також

цифровий вихід нульової мітки, який дозволяє завжди розрахувати абсолютне положення вала.

Абсолютні енкодери

Абсолютні енкодери, як оптичні, так і магнітні мають своєю основною робочою характеристикою число кроків, тобто унікальних кодів на оборот і кількість таких обертів, при цьому не потрібно первинної установки і ініціалізації датчика. Тому абсолютні енкодери не втрачають свою позицію при зникненні напруги.

Найбільш поширені типи виходів сигналу - це код Грея, паралельний код, інтерфейси Profibus-DP, CANopen, DeviceNet, SSI, LWL, через які здійснюється програмування датчиків.

Абсолютний енкодер відноситься до типу енкодерів, який виконує унікальний код для кожної позиції валу. На відміну від інкременального енкодера, лічильник імпульсів не потрібен,тому кут повороту завжди відомий. Абсолютний енкодер формує сигнал як під час обертання, так і в режимі спокою. Диск абсолютного енкодера відрізняється від диска покрокового енкодера, так як має кілька концентричних доріжок. Кожною доріжкою формується унікальний двійковий код для конкретної позиції валу.

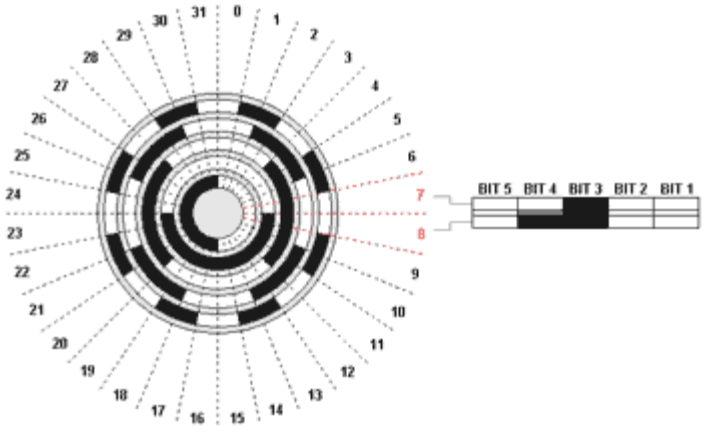


Рисунок 4.23 – Кодовий диск абсолютного енкодера

Абсолютний енкодер не втрачає свого значення при втраті живлення і не вимагає повернення в початкову позицію. Сигнал абсолютного енкодера не схильний до перешкод і для нього не потрібно точна установка валу. Крім того, навіть якщо кодований сигнал не може бути прочитаний енкодером якщо, наприклад, вал обертається дуже швидко, правильний кут обертання буде зареєстрований, коли швидкість обертання зменшиться. Абсолютний енкодер стійкий до вібрацій [33].

Подання інформації в енкодерах. Двійковий код.

Двійковий код (ДК) – це широко розповсюджений код, який може оброблятися безпосередньо мікропроцесором і є основним кодом для обробки цифрових сигналів. Двійковий код складається тільки з 0 і 1.

Побудова ДК здійснюється за наступним принципом:

$$1x2^3+0x2^2+1x2^1+0x2^0$$

Таким чином виглядає в даному випадку число 10 у двійковому коді.

Найбільше число, яке може бути виражене двійковим кодом, залежить від кількості використовуваних розрядів, тобто від кількості бітів у комбінації, що виражає кількість [30].

Звідси видно, що для кількості більше 7 при 3-розрядному коді вже немає кодових комбінацій із 0 та 1. Переходячи від чисел до фізичних величин сформулюємо вищенаведене твердження в більш загальному вигляді: найбільшу кількість значень m якої-небудь величини (кута повороту, напруги, струму та ін), яке може бути виражене двійковим кодом, залежить від кількості використовуваних розрядів n як m =2 n . Якщо n =3, як у розглянутому прикладі, то отримаємо 8 значень, включаючи провідний 0. Двійковий код є багатокроковим кодом. Це означає, що при переході з одного положення (значення) в інше можуть змінюватися кілька бітів одночасно. Наприклад, число 3 в двійковому коді = 011. Число 4 в двійковому коді = 100. Відповідно, при переході від 3 до 4 змінюють свій стан на протилежне всі 3 біта одночасно. Зчитування такого коду з кодового диска призвело б до того, що з-за неминучих відхилень при виробництві

кодового диска зміна інформації від кожної з доріжок окремо ніколи не відбудеться одночасно. Це, в свою чергу, призвело б до того, що при переході від одного числа до іншого короткочасно буде видана невірна інформація. Так при вищезгаданому переході від 3 до 4 дуже ймовірна короткочасна видача числа 7, коли, наприклад, старший біт під час переходу поміняв своє значення трохи раніше, ніж інші. Таким чином, використання звичайного двійкового коду може призвести до великих погрішностей, так як дві сусідні кодові комбінації можуть відрізнятися один від одного не в одному, а в декількох розрядах. Щоб уникнути цього застосовується так званий однокроковий код, наприклад, так званий Грей-код [31].

Код Грея краще звичайного двійкового тим, що володіє властивістю безперервності бінарної комбінації: зміна кодованого числа на одиницю відповідає зміні кодової комбінації лише в одному розряді. Він будується на базі двійкового за наступним правилом: старший розряд залишається без зміни; кожний наступний розряд інверсію, якщо попередній розряд вихідного двійкового коду дорівнює одиниці. Цей алгоритм побудови може бути формально представлений як результат складання по модулю два вихідної комбінації двійкового коду з такою ж комбінацією, але зрушеної на один розряд вправо. При цьому крайній правий розряд зрушеної комбінації відкидається.

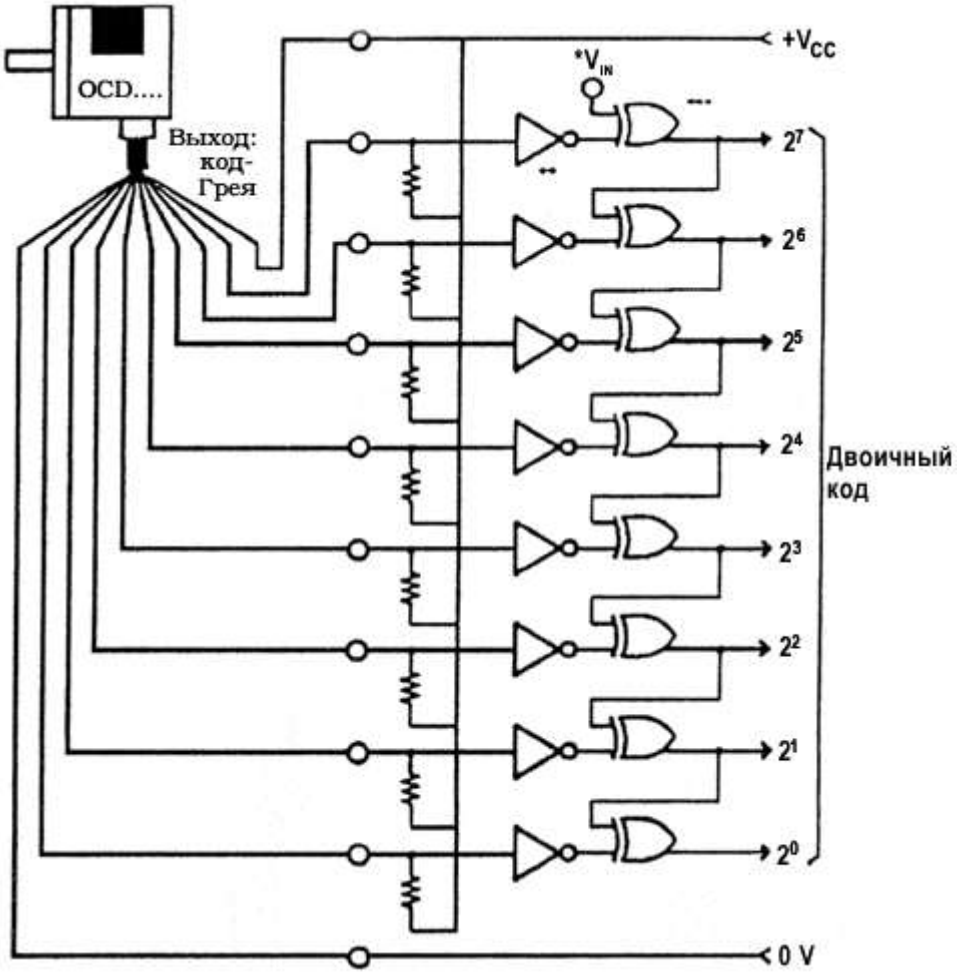
Таким чином, Грей-код є так званим однокроковим кодом, тому що при переході від одного числа до іншого завжди змінюється лише якийсь один біт. Похибка при зчитуванні інформації з механічного кодового диска при переході від одного числа до іншого призведе лише до того, що перехід від одного стану до іншому буде лише дещо зміщений у часі, однак видача абсолютно невірного значення кутового положення при переході від одного положення до іншого повністю виключається. Перевагою Грей-коду є також його здатність дзеркального відображення інформації. Так, інвертуємо старший біт можна простим чином змінювати напрямок рахунку і, таким чином, підбирати до фактичного (фізичного) напрямку обертання осі. Зміна

напряму рахунку може легко змінюватися, керуючи так званим входом " Complement ". Видається значення може бути зростаючим чи спадаючим при одному і тому ж фізичному напрямку обертання осі [34].

Оскільки інформація, виражена в Грей-коді, має суто кодований характер не несе реальної числової інформації, повинен він перед подальшою обробкою спершу перетворений в стандартний бінарний код. Здійснюється це за допомогою перетворювача коду (декодера Грей-Бінар), який на щастя легко реалізується за допомогою ланцюга з логічних елементів «виключне або» (XOR) як програмним, так і апаратним способом.

При переході від одного числа до іншого (наступного) лише один біт інформації змінює свій стан, якщо число представлено кодом Грея, в той час, як у двійковому коді можуть змінити свій стан декілька біт одночасно. Код Грея – вихід, отже, він ніколи не має помилку читання і застосовується в багатьох абсолютних энкодерах.

Біти змінюють свій стан, при переході від одного числа до іншого, позначені червоним кольором. Використовуйте таку схему для перетворення Коду Грея в двійковий код [35].



Рисисунок 4.24 – Схема для перетворення Коду Грея в двійковий код

Звичайний однокроковий Грей-код підходить для дозволів, які можуть бути представлені у вигляді числа зведеного ступінь 2. У випадках, де треба реалізувати інші дозволи зі звичайного Грей-коду, вирізається і використовується середній його ділянку. Таким чином, зберігається «о однокроковість» коду. Однак числовий діапазон починається не з нуля, а зсувається на певне значення. При обробці інформації від генерованого сигналу віднімається половина різниці між початковим і редукованим роздільною здатністю. Такі дозволи як, наприклад, 360° для вираження кута часто реалізується цим методом. Так 9-ти бітний Грей-код рівний 512 крокам, урізаний з обох сторін на 76 кроків буде дорівнює 360°.

Вимірювальна система абсолютного енкодера складається з поворотної осі, монтованій на двох високопрецизійних підшипниках, кодового диска, встановленого на вісь, а також оптоелектроною системою зчитування матриці і схеми обробки сигналу. В якості джерела світла служить світлодіод, інфрачервоні промені якого просвічують кодовий диск і потрапляють на фототранзисторну матрицю, розташовану із зворотного боку кодового диска. При кожному кроці кутового положення кодового диска темні ділянки коду запобігають попадання світла на ті чи інші фототранзистори фототранзисторной матриці. Таким чином, темні - світлі ділянки кожної з доріжок будуть відображені на фототранзисторній матриці і перетворені в електричні сигнали. Електричні сигнали, в свою чергу, готуються операційними підсилювачами і вихідними трайберами для видачі у вигляді n-біт бінарного сигналу. Зміни інтенсивності джерела світлового потоку реєструються з допомогою додаткового сенсора і компенсуються електронною схемою.

Однообертовий енкодер

Однообертовими (Single - Turn) датчиками називаються датчики, які видають абсолютне значення в межах одного обороту, тобто в радіусі 360°. Після одного обороту код є повністю пройденим і починається знову з його початкового значення. Ці датчики служать, переважно, для вимірювання кута повороту і застосовуються, наприклад, в антенних системах, ексцентричних колінчастих пресах і т.д.

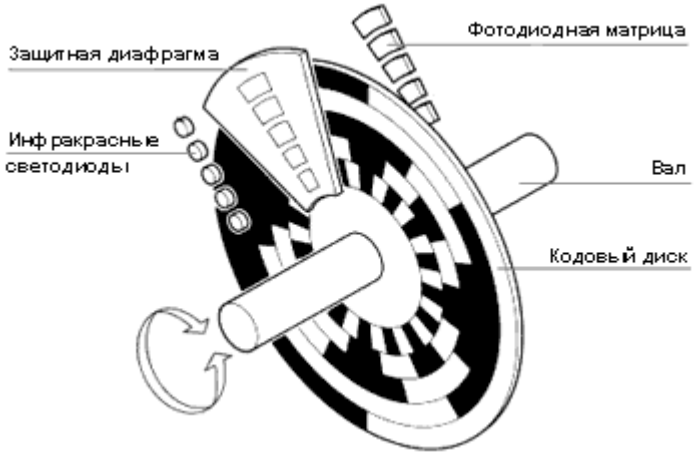


Рисунок 4.25 – Пристрій однообертового енкодера

Багатообертовий енкодер

Лінійні переміщення припускають необхідним застосування вимірювальної системи з n-кількістю оборотів. Наприклад, при лінійних приводах або при задачах вимірювання за допомогою зубчастої вимірювальної штанги, застосування однообертових датчиків є неприйнятним. В цьому випадку приходять на допомогу датчики, де додатково до вимірювання кута повороту в межах одного обороту також відбувається реєстрація кількості обертів з допомогою додатково вбудованого передавального механізму, тобто свого роду редуктора з декількох кодових оптичних дисків, утворюючи, таким чином, багатооборотний енкодер (Multi - Turn).

Оптичні енкодери

Оптичні енкодери мають жорстко і закріплений співвісно валу скляний диск з прецизійної оптичної шкалою. При обертанні об'єкта оптопара зчитує інформацію, а електроніка перетворює її в послідовність дискретних електричних імпульсів. Абсолютні оптичні енкодери - це датчики кута повороту, де кожному положенню валу відповідає унікальний цифровий вихідний код, який поряд з числом оборотів є основним робочим параметром

датчика. Абсолютні оптичні енкодери, так само як і інкрементальні енкодери, зчитують і фіксують параметри обертання оптичного диска [30].

Магнітні енкодери

Магнітні енкодери з високою точністю реєструють проходження магнітних полюсів обертового магнітного елемента безпосередньо поблизу чутливого елемента, перетворюючи ці дані у відповідний цифровий код. Механічні і оптичні енкодери з послідовним виходом. Містять диск з діелектрика або скла з нанесеними опуклими, які проводять або непрозорими ділянками. Зчитування абсолютного кута повороту диска проводиться лінійкою перемикачів або контактів у випадку механічної схеми і лінійкою оптронів у разі оптичної. Вихідні сигнали являють собою код Грея, що дозволяє позбавитися від неоднозначності інтерпретації сигналу.

Датчики положення.

Індуктосини. Індуктосин – це богатополюсний обертовий трансформатор з друкованими обмотками. Основним елементом у індуктосині є два диска з електроізоляційного матеріала або метала з електроізоляційним покриттям. Один з дисків (ротор) з’єднаний з валом, положення якого контролюється, а другий (статор) закріплений. Відносно один до одного диски розташовані на однієї осі паралельно.На суміжні поверхні дисків нанесені друковані обмотки складені з плоских провідників.Електромагнитний зв’язок між обмотками здійснюється за рахунок магнітного потока, який проходить крізь повітряний зазор.Індуктосини мають дуже велику точність (одиниці кутових секунд), але дуже низкий вихідний сигнал.

4.4 Датчики маси, тиску, вологи

Давачі тиску

Загальні відомості. Великий французький фізик Блез Паскаль у 1647 році провів один дослід: він виміряв висоту ртутного стовпця біля підніжжя гори і на її вершині. При цьому він виявив, що тиск, який діє на стовпець

ртуті залежить від висоти підйому. Свій прилад, який він використав у цьому експерименті, Паскаль назвав барометром. Звідси і назва барометричний, або атмосферний тиск [31].

У загальному вигляді, всі матеріали можна розділити на тверді тіла та рідкі середовища. Під терміном рідке середовище тут розуміється все, що здатне текти. Це можуть бути як рідини так і гази, оскільки між ними не існує серйозної різниці. При зміні тиску рідини перетворюються в гази і навпаки, тому поняття «рідини та гази» є умовним.

До рідких середовищ неможливо прикласти тиск ні в якому іншому напрямку, окрім перпендикулярного до поверхні. За будь-якого кута окрім 90º рідина буде просто сповзати або стікати.

Тиск атмосферного повітря залежить у кожен визначений час від висоти. У середньому на рівні моря він дорівнює 760 мм рт. ст. при температурі ртуті 0° С. Ця величина називається фізичною атмосферою (атм), чи нормальним тиском.

Перевищення тиску зовнішнього середовища над атмосферним називають надлишковим тиском. Зменшення тиску щодо атмосферного називають розрідженням. Суму манометричного і атмосферного тисків називають абсолютним тиском, що діє на тіло. Для вимірювання надлишкового тиску використовують манометри, а розрідження – вакуумметри [30].

Застосовувані в техніці прилади для вимірювання тиску – манометри фіксують різницю між абсолютним тиском рабс у місці вимірювання і зовнішнім атмосферним (барометричним) $p_{бар}$ тиском, тобто надлишковий тиск рнадл (рис.4.26). Якщо вимірюваний абсолютний тиск є вищим від барометричного, то $p_{надл} = p_{абс} - p_{бар}$ чи $p_{абс} = p_{надл} + p_{бар}$.

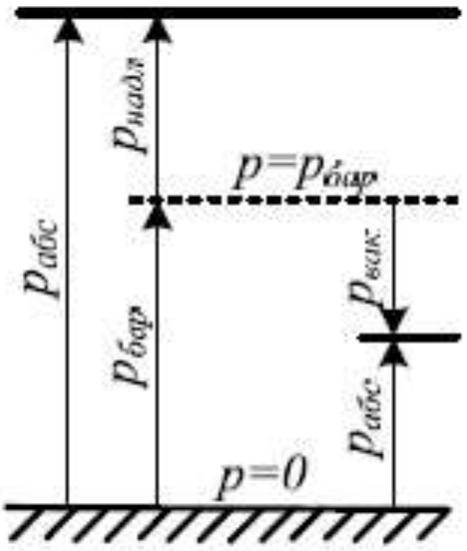


Рисунок 4.26 – До вимірювання тиску

Надлишковий тиск рнадл інакше називається манометричним, або робочим тиском.

Якщо в посудині тиск менший від атмосферного, то має місце розрідження. Різниця між барометричним і абсолютним тиском є не що інше як розрідження, інакше вакуум.

Датчик тиску це пристрій, фізичні параметри якого змінюються залежно від тиску вимірюваного середовища (рідини, газу, пари). У датчиках тиску тиск вимірюваного середовища перетворюється в логічний (дискретний), стандартний аналоговий або цифровий сигнал [36].

Принцип дії будь-якого давача тиску полягає у первинному перетворенні тиску, який діє на сенсор, в електричний сигнал. У конструкцію практично усіх давачів тиску входять сенсори, які володіють відомою площею поверхні, деформація або переміщення яких під дією тиску визначаються в процесі вимірювань. Тобто багато давачів тиску реалізуються на основі сенсорів елементів переміщення або сили, причиною виникнення якої є також переміщення (складені сенсори).

Загалом датчик тиску складається з первинного перетворювача тиску, який містить чутливий елемент і приймач тиску, схеми вторинної обробки сигналу (актуатора), різних за конструкцією корпусних деталей і пристрою

виводу. Основною відмінністю одних давачів від інших є точність реєстрації тиску, яка залежить від принципу перетворення тиску в електричний сигнал: тензорезистивний, п’єзорезистивний, ємнісний, індуктивний, резонансний, іонізаційний тощо.

Опорний тиск – атмосферний, тобто одна сторона мембрани з'єднана з атмосферою; диференціальний тиск – призначений для вимірювання різниці тиску середовища і використовуються для вимірювання витрати рідин, газу, пари, рівня рідини.

Тиск подається на обидві сторони мембрани, а вихідний сигнал залежить від різниці тисків.

Конструктивно гідростатичні датчики бувають двох типів: мембранні і заглибні. У першому випадку тензорезистивний або ємнісний сенсор безпосередньо з'єднаний з мембраною і весь датчик знаходиться в нижній частині резервуара, при цьому розташування мембрани давача відповідає мінімальному рівневі. У випадку заглибного датчика мембрана знаходиться в рідині і передає тиск на тензорезистивний сенсор через стовп повітря запаяний у трубці, яка підводить повітря [30].

Гідростатичні датчики забезпечують високу точність при невисокій вартості і простоті конструкції.

Механічні сенсори, які входять до складу датчиків тиску, є механічними пристроями, що деформуються під дією зовнішнього напруження. Кожен з цих пристроїв перетворює тиск рідини або газу в силу згідно з законом F=pS. Якщо немає механічних обмежень, то чутливий елемент за рахунок своєї пружності буде робити рух, пропорційний прикладеному тискові. Такими пристроями можуть бути сильфони, гофровані діафрагми, мембрани, трубки Бурдона (С-подібні, спіральні і закручені) й інші елементи, форма яких змінюється під дією на них тиску.

Виготовляють сильфони зі сталі, латуні, фосфористої і берилієвої бронзи. Сильфон перетворює тиск у лінійне переміщення, яке може бути виміряне за допомогою відповідного перетворювача переміщення в

електричний сигнал, тобто виконує перший етап перетворень тиску в електричний сигнал. Він володіє відносно великою площею поверхні, що дає можливість одержувати досить істотні переміщення навіть при невеликих тисках. Жорсткість цільного металевого сильфона пропорційна модулеві Юнга (характеристиці пружних властивостей ізотропних речовин) і обернено пропорційна зовнішньому діаметру і кількості вигинів на ньому. Вона також зв'язана кубічною залежністю з товщиною стінок сильфона.

Діафрагма, яка формує одну зі стінок камери тиску, механічно зв'язана з тензорезистором, який перетворює її відхилення в електричний сигнал.

Мембрана – це тонка діафрагма з радіальним розтягом S. Коефіцієнтом жорсткості при згині тут можна знехтувати, оскільки товщина мембрани є набагато меншою від її радіуса (принаймні у 200 разів). Прикладений тиск до однієї зі сторін мембрани сферично вигинає її. При низьких значеннях тиску p відхилення центра мембрани z_{max} є квазілінійною функцією тиску.

При значній товщині мембрани, коли відношення радіуса r до товщини мембрани Δ – $r/\Delta<100$, мова вже йде про тонку пластину. Якщо таку пластину закріпити між двома затискними кільцями, у системі появиться значний гістерезис, викликаний силами тертя між кільцями і пластиною. Тому пластину і підтримувальні компоненти краще виготовляти у вигляді монолітної конструкції [34].

Трубка Бурдона є відрізком прямокутної в перерізі труби, запаяної з однієї сторони і вигнутої по дузі кола. Її виготовляють зі сплавів, що мають пружні властивості. Вироби з таких сплавів після деформації прикладеною до них силою після зняття навантаження приймають попередню форму. Але деформація не повинна бути більшою, ніж дозволяє коефіцієнт пружної деформації для конкретного сплаву.

Тензорезистивні сенсори тиску. Чутливі елементи базуються на принципі зміни опору при деформації тензорезисторів, приклеєних до пружного елемента, який деформується під дією тиску. Усі тензодавачі побудовані на підставі п’єзорезистивного ефекту, який розглядається нижче.

Зазвичай при механічній деформації матеріалу його електричний опір змінюється. З одного боку, у деяких випадках цей ефект є причиною виникнення похибок. З іншого боку, на його основі можна реалізувати тензорезистивні сенсори, що реагують на механічне напруження.

Об’єм проводу v залишається постійним, тоді як його довжина збільшується, а площа поперечного перерізу зменшується.

З цього виразу можна зробити висновок, що чутливість підвищується при збільшенні довжини проводу і його питомого опору, а також при зменшенні поперечного перерізу [30].

Для металевих проводів він лежить у межах 2 – 6, а для напівпровідників – 40 – 200.

Набули поширення дротові і фольгові тензорезистори, що виготовляють із провідників типу манганіну, ніхрому, константану, а також напівпровідникові тензорезистори, що виготовляють із кремнію та германію. Опір тензорезисторів, що виготовляють із провідників, становить 30 – 500 Ом, а опір напівпровідникових тензорезисторів від 50 Ом до 10 кОм.

Удосконалювання технології виготовлення напівпровідникових тензорезисторів створило можливість виготовляти тензорезистори безпосередньо на кристалічному елементі, виконаному із кремнію або сапфіру. Елементи кристалічних матеріалів мають пружні властивості, що наближаються до ідеальних. Кремнієві перетворювачі мають високу часову і температурну стабільність.

Для вимірювання тиску чистих неагресивних діелектриків застосовуються вирішення, що базуються на використанні чутливих елементів або без покриття, або з захистом силіконовим гелем. Для вимірювання тиску агресивних середовищ і у більшості промислових застосуваннях використовується перетворювач тиску в герметичному метало-скляному корпусі, з роздільною діафрагмою з нержавіючої сталі, що передає тиск вимірюваного середовища за допомогою кремнійорганічної рідини [36].

Зазвичай у реальних пристроях тензорезистор наклеюється на пружну діафрагму. Під впливом прикладеного тиску діафрагма деформується, разом з нею деформується і тензорезистор.

Класи точності тензорезистивних датчиків надлишкового тиску, вакууму та різниці тисків 0,6; 1,0; 1,5.

Діапазони вимірювання:

− надлишкового тиску – від 0 – 10-3 до 0 – 60 МПа;

− розрідження – 1 – 0 кПа;

− абсолютного тиску – від 0 – 2,5 кПа до 0 – 2,5 МПа;

− різниці тисків – від 0 – 1 кПа до 0 – 2,5 МПа.

Робочим середовищем для датчика є рідини (у т.ч. технічна вода, оливи, дизельне паливо, мазут), пара, гази, парогазові і газові суміші при тиску, що не перевищує верхню межу вимірювання датчика. Чутливим елементом застосовується тензоперетворювач, на якому розміщена тензочутлива напівпровідникова схема з чотирьох тензорезисторів, з'єднаних у відомий міст Уітстона. Під дією тиску вимірюваного середовища мембрана чутливого елемента прогинається. Тензорезистори, деформуючись змінюють свій опір. У результаті відбувається розбаланс моста пропорційно вимірюваному тискові. Розбаланс у вигляді електричного сигналу перетворюється електронним блоком, розташованим у корпусі датчика, у вихідний стандартний сигнал постійного струму 4 – 20 мА.

П’єзорезистивні сенсори тиску. П’єзорезистивний метод вимірювання тиску заснований на інтегральних чутливих елементах з монокристалічного кремнію. П'єзорезистивний ефект відрізняється від п'єзоелектричного. На відміну від п'єзоефекту, під час п'єзорезистивного ефекту змінюється лише електричний опір провідника, але він не породжує електричний потенціал.

Сьогодні в технічній літературі можна зустріти описи як тензорезистивного сенсорів тиску, так і п’єзорезистивного сенсорів тиску, хоча і перші і другі побудовані на підставі явища п’єзорезистивного ефекту.

Зазвичай тензорезистивними називають сенсори виготовлені за технологією “кремній на сапфірі” (КНС), а п’єзорезистивними – виготовлені за технологією “кремній на кремнії” (КНК). Крім цього, якщо в перших деформація відбувається за рахунок згину тощо, то в других – внаслідок стискання.

До складу сенсорів тиску з п'єзорезистивним ефектом обов'язково входять два компоненти: пластина (мембрана) відомої площі S і перетворювач, вихідний сигнал якого пропорційний прикладеній силі F(p=F/S). Обидва ці елементи можуть бути виготовлені з кремнію. Сенсор тиску з кремнієвою діафрагмою складається із самої діафрагми й убудованих у неї дифузійним методом п’єзорезистивних перетворювачів у вигляді резисторів. Оскільки монокристалічний кремній має дуже добрі характеристики пружності, у такому давачі відсутня повзучість і гістерезис навіть при високому тиску. Коефіцієнт тензочутливості кремнію в багато разів перевищує аналогічний коефіцієнт тонкого металевого провідника. Зазвичай тензорезистори включаються за схемою моста Уітстона. Максимальна вихідна напруга таких давачів зазвичай складає декілька сотень мілівольтів, тому на їхньому виході, як правило, ставлять підсилювачі сигналів [35].

Кремнієві резистори мають досить високу температурну чутливість, тому завжди при розробці давачів на їхній основі необхідно передбачати кола температурної компенсації.

Технологія «кремній на кремнії» (КНК) у даний час є найбільш перспективною технологією, тому що пропонує найкраще співвідношення ціна/вихідні параметри. Технологія заснована на виготовленні сенсора з монокристалу кремнію з нанесеним на нього методом дифузії тензорезистивним мостом. Достоїнствами даної технології є висока стабільність, низький гістерезис, висока перевантажувальна здатність і відносно висока чутливість, а відповідно, і точність перетворення. До недоліків відносяться низький робочий температурний діапазон (до 120 ºС) і

необхідність захищати чутливий елемент металевою мембраною, що знижує чутливість і збільшує нелінійність перетворення.

Датчик поставляється з установленим сигнальним кабелем (зазначеної при замовленні довжини), який містить, крім сигнальних проводів, капіляр для зв'язку з атмосферним тиском. У комплекті з датчиком може поставлятися клемна коробка, призначена для підключення перетворювача до вимірювальних ліній. Сенсор датчика виготовлений на основі технології КНК.

Датчик призначений для безперервного перетворення тиску стовпа рідини, що не кристалізується (не замерзає), в стандартний електричний сигнал постійного струму 4...20 мА.

Ємнісний сенсор тиску є конденсатором, складеним із двох пластин, розділених діелектриком. Ємнісні датчики використовують метод зміни ємності конденсатора при зміні відстані між пластинами. Відомі керамічні або кремнієві ємнісні сенсори тиску і сенсори, виконані з використанням пружної металевої мембрани. При зміні тиску мембрана з електродом деформується і відбувається зміна ємності. В елементі з кераміки або кремнію, простір між пластинами зазвичай заповнено олією або іншою органічною рідиною. Таку конструкцію сенсора називають одно статорною.

У двостаторній (диференціальній) конструкції діафрагма переміщується між двома нерухомими пластинами. В одну з двох камер подається опорний тиск, що забезпечує пряме вимірювання диференціального (надмірного або різницевого) тиску з найменшою похибкою.

Рідина (зазвичай кремнійорганічна), яка заповнює простір між обкладинками конденсатора, є добрим ефективним діелектриком і виконує функцію передачі тиску від роздільної діафрагми до чутливої діафрагми.

Будь-яка різниця тиску упоперек комірки змусить діафрагму згинатися у напрямі меншого тиску. Чутлива діафрагма – виготовлений з високою точністю пружний елемент, зміщення якого – передбачувана функція

прикладеної сили. Прикладена сила в цьому випадку є функцією диференціального (різницевого) тиску, що діє перпендикулярно до поверхні діафрагми. Оскільки діафрагма є, по суті, однією з пластин пари конденсаторів, то ємність конденсаторів змінюватиметься при переміщенні діафрагми через зміну відстані між пластинами [35].

Електронна схема датчика тиску, виконаного на основі такого сенсора, подає на сенсор сигнал змінного струму і безперервно вимірює різницю електричних ємностей пари диференціальних конденсаторів, яка є функцією вимірюваного тиску.

Перевагою чутливого ємнісного елемента є простота конструкції, висока точність і часова стабільність, можливість вимірювати низькі тиски і слабкий вакуум.

До недоліку можна віднести нелінійну залежність ємності від прикладеного тиску.

Для забезпечення доброї лінійності ємнісних датчиків необхідно, щоб діафрагми мали рівну поверхню центральної частини. Традиційно вважається, що ємнісні датчики мають лінійність тільки тоді, коли переміщення діафрагм є значно меншим від їхньої товщини. Одним зі способів поліпшення лінійності є використання гофрованих діафрагм, виготовлених методами мікротехнологій [34].

Робоче середовище для датчиків – рідини (у тому числі технічна вода), пара, гази, парогазові і газові суміші при тиску, що не перевищує верхню межу вимірювання давача і нейтральні або неагресивні стосовно контактуючих з ними матеріалів давача. Датчик з ємнісним сенсором, металевими мембранами з нержавіючої сталі AISI316L (вітчизняний аналог 03Х17Н14М2), фланцевим під'єднанням і металевим кабельним уводом.

Датчик дозволяє вимірювати диференціальний тиск. При цьому вимірюваний тиск безперервно перетворюється в стандартний струмовий вихідний сигнал 4–20 мА і цифровий сигнал за протоколом HART. Датчик разом з витратомірними шайбами дозволяє вимірювати витрату рідких і

газоподібних середовищ. Так само надає можливість вимірювати рівень рідини в резервуарах під тиском [35].

Структурно датчик складається з вимірювального й обчислювального блоків. Вимірювальний блок розташовується у вхідній частині давача і призначений для перетворення вимірюваного тиску в електричний сигнал (P\U) за допомогою вбудованого ємнісного сенсора. Вимірювальний блок містить також термодавач (T\U) для визначення температури сенсора. Сигнали від вимірювального блоку надходять в обчислювальний блок. Обчислювальний 1080 блок має у своєму складі аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікроконтролер (МК), стабілізатор напруги живлення (DC/DC) і формувач вихідного сигналу (ЦАП з вихідним струмовим сигналом і HART-модем).

Отриманий від вимірювального блоку електричний сигнал перетворюється за допомогою АЦП у цифровий, який обробляється мікроконтролером і надходить на вихід давача та на індикацію.

Датчик поставляється або без індикації, або з РК-дисплеєм (РКД) і трикнопковою клавіатурою. Кнопки й дисплей дозволяють на місці експлуатації виконувати часткове налаштування давача, здійснювати установку „нуля” і „діапазону” давача без використання додаткових пристроїв [30].

На лицьовій панелі обчислювального блоку розташовані елементи управління і індикації:

− РК-дисплей з підсвічуванням для відображення вимірюваних величин;

− кнопка, призначена для входу в меню редагування параметрів приладу вибору параметра і запису відредагованого значення;

− кнопка, призначена для зміни значення редагованого параметра і вибору позиції редагованої цифри;

− кнопка, призначена для збільшення значення редагованої цифри.

РК-дисплей в режимі вимірювання тиску відображає:

− величину вимірюваного тиску в цифровому вигляді, у встановлених при налаштуванні одиницях вимірювання;

− одиниці вимірювання (мА, Па, кПа, МПа або величину вимірюваного тиску у відсотках від верхньої межі вимірювання);

− лінійну шкалу з індикацією виміряного тиску відносно верхньої межі вимірювання.

Датчик з цифровим вихідним сигналом HART-протоколу має можливість передавати інформацію про вимірювану величину в цифровому вигляді по двопровідній лінії зв'язку разом із сигналом постійного струму 4–20 мА. Цей цифровий сигнал може прийматися й оброблятися будь-яким пристроєм, що підтримує протокол HART (наприклад, HART-комунікатором або ПК із HART-модемом) [35].

HART-протокол опирається на метод передачі даних за допомогою частотної модуляції відповідно до комунікаційного стандарту Bell202. Цифрова інформація передається частотами 1200 Гц (логічна одиниця) і 2200 Гц (логічний нуль), які накладаються на аналоговий струмовий сигнал.

Наявність HART-модемів, які функціонують за HART-протоколом, пов’язана з потребою спростити структуру давачів із вбудованою мікропроцесорною системою. При такому підході датчик стає, фактично, складеним. Первинний давач об’єднує сенсор і вторинний перетворювач, у ролі якого виступає мікропроцесор датчика. У такому вигляді датчик набуває інтелектуальних рис і виконує ряд додаткових функцій, формуючи зазвичай стандартний аналоговий або цифровий сигнал [30].

Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами вимагають і аналогового, і цифрового сигналів одночасно. Покладання цих функцій на датчик призводить до значного зростання вартості датчика. Крім цього, у разі кодування цифрового сигналу високим („1”) та низьким („0”) рівнями потрібно чотири проводи для зв’язку: два для аналогового і два для

цифрового коду. З метою зменшення числа проводів прийнято стандарт цифрового кодування Bell202, за допомогою якого і аналоговий, і частотно кодований цифровий сигнали передаються лише по двох провідниках. Отож, HART-модулі перебирають на себе функцію частотної модуляції і виступають як вторинні блоки датчика, працюючи сукупно з первинним да, а за потреби і з комп'ютером. Зазначимо, що розділення шляхом фільтрації аналогового і цифрового сигналів у разі кодування числа частотною модуляцією не складає труднощів.

Датчик і HART-модем можуть бути віддалені один від одного на значну віддаль завдяки добре налаштованому послідовному зв'язку. Цей зв'язок виникає по тих самих двох проводах, які вже використовуються для з'єднання первинного давача з системою керування у центральній кімнаті керування. «Інтелектуальні» первинні давачі з HART-протоколом дають змогу аналоговим і цифровим сигналам існувати в одній і тій же парі проводів, не псуючи аналоговий сигнал.

HART-інтерфейс – це робота в режимі «ведучий–ведений» (master-slave), при цьому перетворювачі виступають веденими (slave). Відповідно, необхідна наявність у мережі ведучих (master), якими може бути ПК або пристрій високого рівня, наприклад, ПЛК [30].

Індуктивні сенсори тиску. При вимірюванні низьких тисків переміщення тонкої пластини або діафрагми може бути невеликим.

Фактично, воно може бути таким маленьким, що тензометричний давач, прикріплений до діафрагми або убудований у неї, буде видавати дуже низький вихідний сигнал, недостатній для наступного його оброблення. Один з можливих способів вирішення цієї проблеми – використання ємнісного давача, у якому, як було сказано, відхилення діафрагми вимірюється за її положенням щодо опорної пластини, а не за напруженням усередині матеріалу. Іншим способом вирішення проблеми вимірювання дуже низьких тисків є застосування індуктивних давачів. Індуктивні датчики вимірюють

зміну магнітного опору трансформатора, викликаного переміщенням магнітної діафрагми, що виникає внаслідок впливу на неї зовнішнього тиску.

Конструкція складається з Е-подібного осердя і котушки. Силові лінії магнітного потоку проходять через осердя, повітряний проміжок і діафрагму. Магнітна проникність матеріалу осердя принаймні в 1000 разів вища від проникності повітряного проміжку, тому його магнітний опір завжди є меншим від опору повітря. У зв'язку з цим величина індуктивності всієї цієї конструкції визначається величиною проміжку. При відхиленні діафрагми величина повітряного проміжку або збільшується, або зменшується залежно від напрямку переміщення, яке викликає модуляцію індуктивності.

Котушки покриті спеціальним складом, що забезпечує міцність системи навіть при впливі дуже високих тисків. З двох сторін діафрагми сформовані вузькі робочі камери, з'єднані з вхідними портами подачі тиску. Робочий діапазон датчика визначається товщиною діафрагми, однак повне відхилення діафрагми рідко перевищує 25–30 мкм, тому такі перетворювачі, в основному, застосовуються для вимірювання низьких тисків [30].

Невеликі поперечні розміри робочих камер фізично захищають мембрану від надмірного відхилення в умовах надлишкового тиску, тому індуктивні датчики є досить надійними пристроями. Під час проходження змінного струму збудження виникає магнітний потік, який охоплює обидва осердя, повітряні проміжки і діафрагму.

Вихідний сигнал індуктивного датчика пропорційний магнітному опору плечей індуктивного моста Уітстона, у якому активними елементами є індуктивні опори X1 та X2. Індуктивність котушки визначається її геометрією і кількістю витків. Якщо в зону дії магнітного потоку помістити матеріал, який володіє магнітною проникністю (має низький магнітний опір), частина потоку піде туди, що призведе до зміни власної індуктивності котушки.

Індуктивність кола, а отже, і її реактивний опір, обернено пропорційний магнітному опорові, тому справедливий наступний вираз:

X1, X2=k/δ, де k – константа, а δ – величина проміжку.

При збудженні мостової схеми високочастотним сигналом її вихідний сигнал модулюється за амплітудою прикладеного тиску. Амплітуда результуючого сигналу пропорційна розбалансові моста, а його фаза відповідає напрямкові цього розбалансу (йдеться про неврівноважений міст Уітстона). На виході такого сенсора іноді ставлять демодулятор для одержання не змінної, а постійної вихідної напруги.

Резонансні датчики тиску. Резонансний принцип використовується в датчиках тиску, побудованих на підставі вібруючого циліндра, кварцового резонатора, струнних сенсорів тощо. В основі методу лежать хвильові процеси: механічні та електромагнітні. Датчики, побудовані на таких сенсорах, відзначаються високою точністю, стабільністю вихідних характеристик, є надійними і довговічними [30].

Характерним прикладом датчика, який відповідає названим вимогам, є резонансний датчик тиску, в якого чутливим елементом сенсора є кварцовий резонатор.

Кварцовий резонатор є своєрідним тілом, яке поєднує у собі механічні та електричні властивості. Маса та пружність кварцового резонатора визначають його резонансну механічну частоту коливань, а середовище призводить до втрати енергії і згасання коливань. Проте, резонансне коливання кварцу можна підтримувати, якщо до затискачів кварцового резонатора подавати електричні імпульси, частота яких дорівнює резонансній частоті кварцу.

У практиці побудови резонансних датчиків тиску, як правило, застосовують резонанс напруг. У разі такого резонансу спади напруг на індуктивному XL та ємнісному XC реактансах є рівними і перебувають у протифазі, тобто взаємно компенсуються, а прикладена до ланки напруга врівноважується лише спадом напруги на активному опорі R.

Послідовний резонанс забезпечує вузьку смугу пропускання, фільтруючи гармоніки, що й зумовило його застосування у резонансних давачах тиску.

Під час прогинання мембрани кристал кварцу деформується [30].

При цьому змінюються його параметри. Мікропроцесорна система керування датчика відслідковує зміну імпедансу кварцу, і змінює параметри L та C генератора таким чином, щоб частота генератора відповідала резонансній частоті кварцового резонатора. Про такий стан свідчить мінімальний опір кварцу. На підставі резонансної частоти, що встановилась, мікропроцесор виробляє стандартний аналоговий сигнал, який відповідає вимірюваному тиску.

Датчики, які містять у собі мікропроцесори, дістали назву „інтелектуальні”. Зазвичай це додає нові функціональні можливості, яких не було в аналогічних давачах без мікропроцесора. Наприклад, інтелектуальний датчик може давати більш точні покази завдяки застосуванню числових обчислень для компенсації нелінійності чутливих елементів чи температурної залежності; він дає змогу здійснювати налаштування на інший діапазон вимірів, здійснювати само діагностування тощо.

П'єзоелектричний датчик тиску є ще одним прикладом використання п’єзоелектричних елементів у практиці побудови датчиків. Все, що стосується явища п’єзоефекту – виготовлення та особливостей використання п’єзоелектричних чутливих елементів у сенсорах ультразвукових датчиків, описаних вище, цілком відноситься і до чутливих елементів п’єзоелектричних сенсорів у датчиках тиску. Зрештою, кварцовий резонатор є також п’єзоелектриком, що використовується у специфічний спосіб.

Під дією вимірюваного тиску на зовнішній і внутрішній сторонах пари пластин п’єзоелектрика виникають електричні заряди, причому сумарна ЕРС (електрорушійна сила) між виводом і корпусом змінюється пропорційно тиску.

П'єзоелектричні датчики тиску доцільно застосовувати при вимірюванні швидкозмінного тиску; якщо тиск змінюється повільно, то зростає похибка перетворення через “стікання” електричного заряду з пластин на корпус. Вмиканням додаткового конденсатора паралельно до п'єзоелектричного давача можна зменшити похибку вимірювання, проте при цьому зменшується напруга на виводах датчика. Основні переваги п'єзоелектричних давачів тиску – їх високі динамічні характеристики і здатність сприймати коливання тиску з частотою від десятків Гц до десятків МГц. Застосовуються при тензометричних вимірюваннях, у вагових і сортувальних (за вагою) пристроях, при вимірюваннях вібрацій і деформацій тощо [33].

Розвиток обчислювальної техніки стимулювало появу «інтелектуальних» датчиків, що включають до свого складу мікропроцесори. При цьому відкриваються можливості поліпшення метрологічних характеристик перетворювачів, реалізації алгоритмів вимірювання будь-якої складності, попередньої обробки інформації та передачі її в обчислювальні системи вищого рівня.

Інфрачервоні вологоміри

Належать до групи оптичних аналізаторів. Принцип дії інфрачервоних вологомірів заснований на можливості поглинання водою, що міститься в контрольованому матеріалі, енергії світлового потоку з довжинами хвиль, що лежать в ближній інфрачервоній області. В інфрачервоних вологомірах контролю вологості сипких матеріалів використовується метод відображення.

Властивість даних вологомірів – відсутність безпосереднього контакту первинного датчика з вимірюваним матеріалом.

Основний недолік полягає в тому, що вони є вимірниками поверхневої вологи.

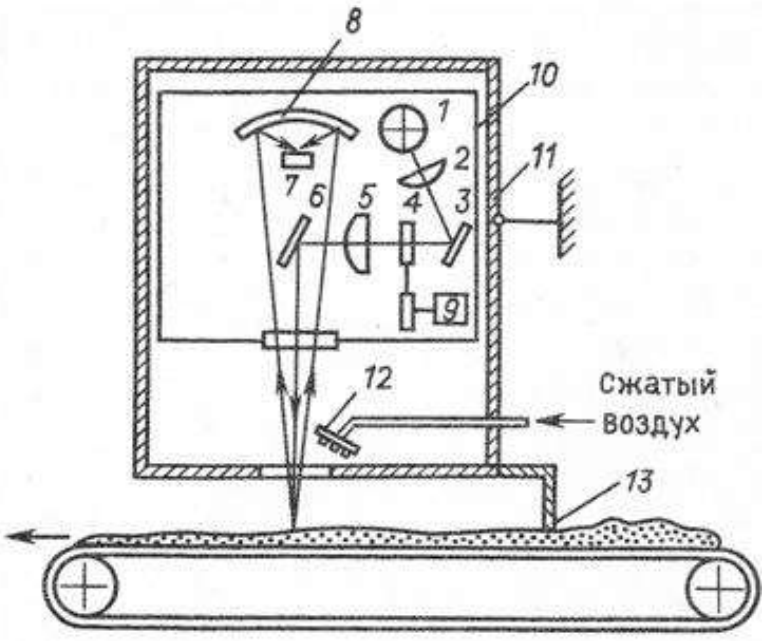


Рисунок 4.27 – Схема установки інфрачервоного вологоміра "Анакон"

1 – джерело випромінювання; 2, 5 – лінзи; 3, 6, 8 – дзеркала; 4 – світлофільтри; 7 – фоторезистор; 9 – двигун; 10 – блок оптичного аналізатора вологості; 11 – захисний кожух; 12 - форсунка подачі стисненого повітря; 13 - формувач потоку матеріалу.

Нейтронні вологоміри

Нейтронний метод вимірювання вологості заснований на втраті енергії швидких нейтронів при зіткненні з атомами водню, що містяться в молекулі води.

При зіткненні нейтронів з ядрами інших елементів втрата енергії значно менша. У цьому вологомірі джерело нейтронного випромінювання (1) і блок детектування повільних нейтронів (2) поміщені в захисному кожусі (3), біля якого безперервно проходить контрольований матеріал. Сигнал від блоку детектування надходить на проміжний перетворювач (Пр) і далі вимірювальний прилад (ІП).

Маса матеріалу в контрольованому обсязі має бути постійною, ця вимога – основний недолік вологоміру [30].

Ще значний недолік застосування таких вологомірів – необхідність захисту персоналу фабрики від впливу нейтронного випромінювання.

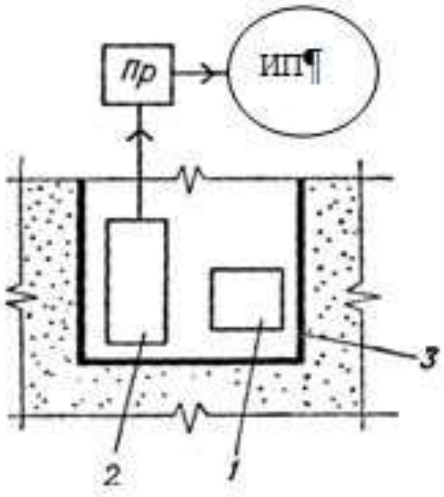


Рисунок 4.28 – Схема нейтронного вологоміра

Ємнісні високочастотні вологоміри

Принцип дії вологомірів цієї групи заснований на залежності діелектричної проникності контрольованого матеріалу, що знаходиться у високочастотному електричному полі від його вологості. Як первинний датчик тут можуть використовуватися різні конструкції пристроїв типу електричних конденсаторів, де між його обкладками розташовується контрольований матеріал, діелектрична проникність якого у великій залежності від його вологості.

На вуглезбагачувальних фабриках набув поширення ємнісний вологомір ВАК-4, розроблений інститутом УкрНДІвуглезбагачення. Датчик має форму "лижі", що спирається з постійним зусиллям на матеріал, що транспортується. Чутливий елемент датчика, закріплений на дні "лижі", являє собою плоску комірку з кільцевими (2) або прямокутними електродами, укріпленими на діелектричній підставі (1) та мають односторонній контакт з контрольованим матеріалом. Вимірювальна система вологоміра містить схему коригування, що ліквідує чутливість вихідного сигналу перетворювача (Пр) до зміни активного опору контрольованого матеріалу. Як вимірювальний прилад (ІП) використано вторинний прилад – автоматичний потенціометр [30].

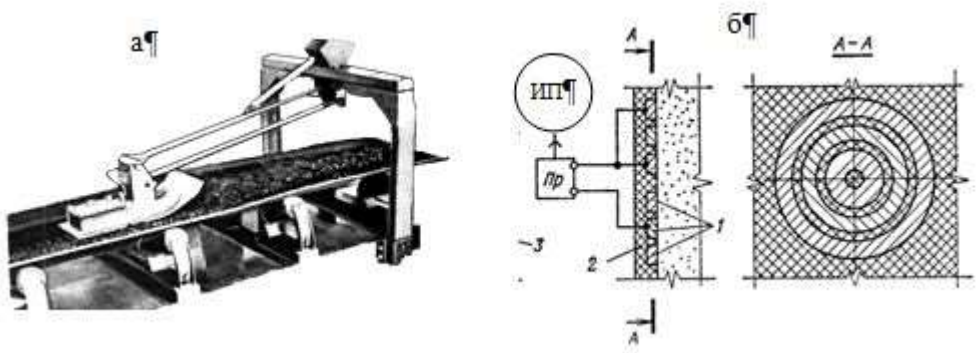


Рисунок 4.29 – Високочастотний ємнісний вологомір ВАК-4
а – зовнішній вигляд датчика вологості; б – чутливий елемент; Пр – перетворювач; ІП – вимірювальний прилад

Тензодатчики

При належному монтажі тензодатчика на об'єкт, що тестується, якщо до об'єкта застосовується механічна напруга (згинання, скручування), опір тензодатчика буде лінійно змінюватися, і цей опір можна буде виміряти. Для розрахунку напруженості та інших сил також можна застосувати математичні формули.

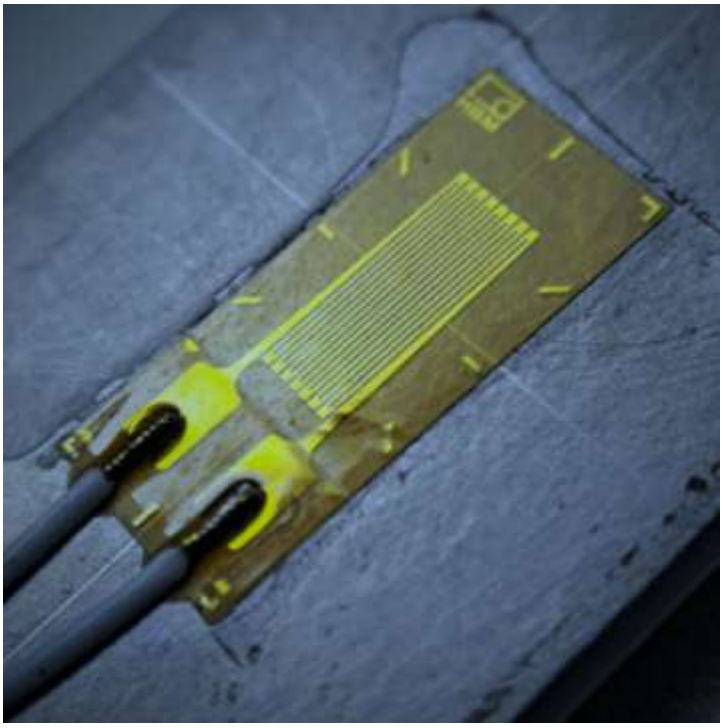


Рисунок 4.30 – Типовий фольговий тензодатчик

Області застосування тензодатчиків [30]:

1. Вимірювання деформації та механічної напруги.

2. Вимірювання ваги та навантаження.

3. Вимірювання сили.

4. Вимірювання ударних навантажень та вібрації.

Переваги тензодатчиків:

1. Самі датчики коштують недорого.

2. У рівній мірі добре поводяться при статичних та динамічних вимірах.

3. Можна застосовувати для широкого спектра завдань.

Недоліки тензодатчиків:

1. Встановлення потребує спеціалізованих знань.

2. Досить складна схема перетворення сигналів.

3. Температура може впливати на результати вимірювань.

Датчики навантаження

Якщо ми підемо ще далі і закріпимо чотири тензодатчики на об'єкті заданої форми, ми отримаємо інший датчик – датчик навантаження. По суті, це датчик сили або тиску.

Найпоширенішими датчиками навантаження є датчики, встановлені в цифрових побутових вагах підлоги. Коли ви встаєте на терези, відбувається стиснення датчиків навантаження. Ми отримуємо зміну в опорі, яку мікроконтролер вимірює та переводить у значення в кг.

Датчик навантаження зі стрижнем або балкою, що згинається (бінокулярною балкою) часто використовується для вимірювання ваги в промисловості. Один кінець стрижня прикріплений до конструкції, а до вільного кінця датчика прикладається сила (див. на схемі F нижче).

Ця сила впливає таким чином, що чотири тензодатчики, вбудовані у верхню і нижню частини, а також у кожний кінець датчика навантаження, розтягуються або стискаються відповідно до застосування/усунення впливу сили на конструкцію датчика навантаження. Незначні зміни у потенціалі з

тензодатчиками наша система збору даних легко переводить у вагові значення.

Перетворювачі струму

Як і напруга, струм - це одна з найбільш фундаментальних форм енергії. Його вимір служить цілям моніторингу та аналізу. Будь то перевірка якості енергії, що передається електричною мережею, вимірювання споживання енергії електромобілем з гібридним двигуном або машиною, оцінка електроживлення відіграє вкрай важливу роль [30].

Для перетворення малих та середніх рівнів струму в напругу можна використовувати струмові шунти. Шунт – це свого роду резистор. Він встановлюється безпосередньо в ланцюг, в якому проводиться вимірювання струму.

Більшість інших типів датчиків та перетворювачів струму на ринку працює на основі індукції або іншого суміжного методу, при якому вони не є частиною електричного кола. Це дозволяє вимірювати вищі рівні струму. Нижче показані типові струмові кліщі - пристрій, який виявляє електромагнітне поле, створюване струмом, та вимірює його. Вихідне значення датчика - це пропорційна напруга, яку наша система збору даних може відображати, зберігати, а також аналізувати [34].

Існують гнучкі котушки Рогівського, які легко встановлюються навіть у важкодоступних місцях або у випадках, коли розмикання ланцюга небажане. Пропонуються також датчики нульового струму та індукційні струмові датчики для більш точного вимірювання, які особливо часто використовуються для оцінки якості електроенергії та суміжних областях. Існує величезна різноманітність датчиків та перетворювачів струму, спеціально розроблених для вирішення різних завдань.

Рисунок 4.31 – Струмовимірювальні кліщі від Dewesoft

Області застосування перетворювачів струму [35]:

1. Виробництво та розподіл енергії: різні випробування, випробування на якість електроенергії, моніторинг атомних електростанцій та електростанцій на викопному паливі.

2. Аерокосмічна галузь: випробування двигунів та систем живлення.

3. Автомобільна галузь: випробування електричних систем, гібридних та електричних двигунів.

4. Перевезення: електричні підземні вагони, випробування контактних рейок та пантографів, енергорозподільні центри.

Переваги перетворювачів струму:

1. Моделі із затискачами просто прикріплюйте до кабелів змінного струму.

2. Гнучкі моделі Рогівського легко підключати у важкодоступних місцях.

3. Кліщі з живленням та без живлення для завдань із змінним струмом.

4. Довгий термін служби.

Недоліки перетворювачів струму

1. Відносно дорогий датчик.

2. Кліщі пост. струму, котушки Рогівського та індукційні датчики вимагають підключення до зовнішнього джерела енергії.

4.5 Датчики оптичні та відео

Оптичні датчики

Оптичні датчики застосовуються у таких областях [36]:

- виявлення світла, інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювань;

- визначення відстані до об'єкта, його присутності/відсутності;

- заміна традиційних датчиків.

Виявлення світла, інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювань

Виявлення або вимірювання рівнів освітлення навколо датчика може бути найрізноманітнішим завданням. Найочевидніший приклад - автоматичне включення та вимкнення освітлення, для якого потрібен фотодатчик.

Навіть мобільні телефони оснащені світловим датчиком для автоматичного налаштування яскравості екрану. Ближнє світло фар більшості автомобілів включається автоматично із заходом сонця, а дальнє світло – автоматично вмикається і вимикається вночі при виявленні транспортного засобу, що наближається. Автоматичні фотокамери вимірюють зовнішнє освітлення для правильного встановлення витримки.

До основних технологій для виконання перерахованих вище завдань (і не тільки їх) належать фотовольтаїка, фотоелементи (або фоторезистори). Вони розроблені для виявлення та вимірювання світла.

Незважаючи на те, що більшість таких датчиків розроблено для спектра, видимого людському оку, деякі датчики працюють з інфрачервоним, а також ультрафіолетовим спектром. Інфрачервоний спектр використовується у багатьох робототехнічних систем, а також у звичайному телевізійному пульті. Інфрачервоні випромінювання не видно людському

оку, але у високих концентраціях можуть бути небезпечні, тому їх виявлення, крім іншого, необхідно проводити з метою безпеки [36].

Фотоелемент, також відомий як фоторезистор або світлочутливий резистор, може визначати присутність і кількість світла, оскільки його вихідні значення змінюються пропорційно кількості світла, що падає на фотоелемент, на якому є сітка, зазвичай виконана з сульфіду кадмію. Коли світло не впливає на елемент, пристрій має дуже високий опір. Коли ж елемент падає світло, опір зменшується пропорційно кількості світла.

Разом з відповідним перетворювачем сигналу його можна використовувати як датчик увімкнення/вимкнення або для вимірювання інтенсивності світла. Залежно від хімічного складу маленькі та недорогі фотоелементи можуть виявляти всі спектри до інфрачервоного.

Фотодатчики (або датчики наближення) та близькі їм напівпровідники (фотодіоди) використовуються для вимірювання відстані до об'єктів або між ними, а також визначення наявності або відсутності будь-якого об'єкта.

Вони широко застосовуються щодо різноманітних завдань у промисловості, зокрема на заводських технологічних лініях визначення правильності розміщення об'єктів на стрічці чи виявлення готовності нового об'єкта для складання. Вони також використовуються в автомобільній галузі для визначення присутності інших автомобілів або об'єктів, а також у системах сигналізацій, CD та DVD-дисках.

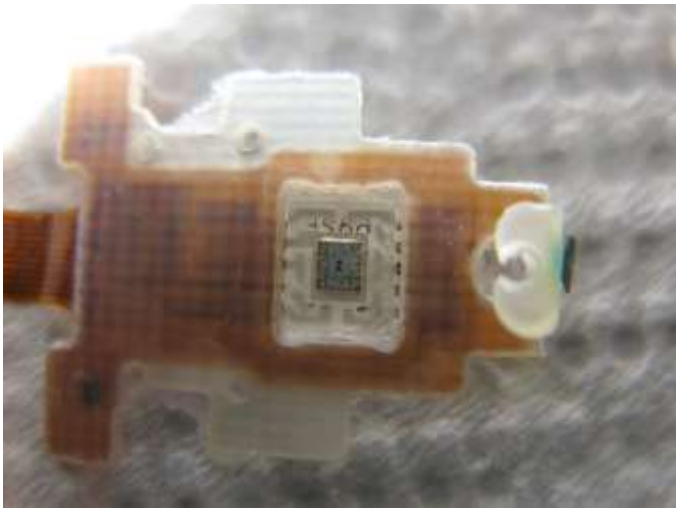


Рисунок 4.32 – Типовий фотодатчик компакт-диска

Наступний рівень – це використання оптики для зчитування даних, тобто для доповнення та заміни традиційних датчиків, таких як тензодатчики, акселерометри, термодатчики та ін [35].

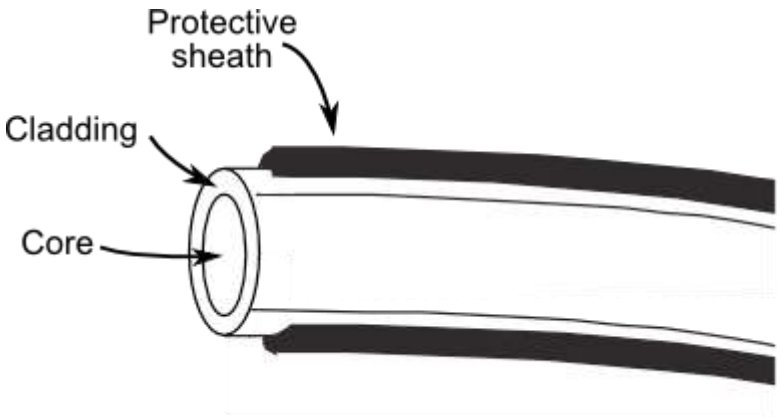


Рисунок 4.33 – Будова оптоволоконного кабелю

У наші дні замість електричної передачі для відправки сигналів з однієї точки до іншої використовується оптоволокно. Поширене майже повсюдно, оптоволокно використовується для підключення телебачення та інтернету та забезпечує більш високі, у порівнянні з традиційними кабелями, швидкості передачі. Оптоволоконна передача також забезпечує явні переваги в порівнянні з електричною передачею [36]:

- стійкість до магнітних перешкод;
- стійкість до опору та нагрівання;
- довга дорога передачі сигналу без втрат;
- численні дроти передачі сигналів можна замінити одним тонким кабелем;
- дуже широка пропускна спроможність.

Області застосування оптичних датчиків

- автоматичне увімкнення/вимкнення світла, системи сигналізації;
- технологічні завдання в промисловості, лінії збирання, конвеєрні системи;
- робототехніка, напрямок руху та виявлення;

- датчики задимлення

- аналіз медичних зразків;

- лазерний далекомір, окуляри нічного бачення;

- автоматичне відчинення дверей.

Переваги оптичних датчиків

- передача по оптоволокну відбувається з дуже великою швидкістю і нечутлива до електромагнітних перешкод та інших зовнішніх сил;

- безконтактні оптичні датчики служать довше;

- більшість оптичних датчиків відрізняється низькою вартістю та малими розмірами.

Недоліки оптичних датчиків - фотоелементи (або фоторезистори) відносно повільно реагують на зміни світла.

Датчики-відеокамери

На заводах датчики-відеокамери для одиничної та безперервної зйомки застосовуються, щоб відстежувати та контролювати різні процеси на лініях виробництва та складання.

Рисунок 4.34 – Промислова високошвидкісна камера DS-CAM від Dewesoft

Відеокамери також відіграють важливу роль у системах збору даних під час виконання вимірювальних завдань. Всі системи збору даних Dewesoft можуть використовувати одну або кілька відеокамер і записувати відео синхронно з аналоговими та цифровими даними.

Скріншот системи збору даних Dewesoft, що демонструє синхронізацію аналогових та цифрових даних з відео https://youtu.be/RwSPUk7yK9U

Професійні та споживчі камери

З одного боку, для додавання відео до записів деяких систем збирання даних можна використовувати дуже недорогі веб-камери. З іншого боку, існують промислові камери з більш якісними об'єктивами і синхронізацією частоти кадрів камери з процесом, що записується і/або частотою вибірки даних.

Наприклад, показана тут модель DS-CAM-600 може виводити до 336 кадрів за секунду у роздільній здатності Full HD або навіть до 600 кадрів за секунду, якщо зменшити розмір зображення. Крім того, герметичний корпус камери захищає її від вологи, пилу та атмосферних впливів (ступінь захисту IP 67). У системах збору даних Dewesoft можна використовувати кілька камер одночасно, що дозволяє отримати різні кути огляду об'єктів, що тестуються.

Коли на початку 2000-х компанія Dewesoft додала звичайну веб-камеру до систем збору даних, це стало справжнім проривом на ринку. Наступним логічним кроком стало використання промислових камер, частоту кадрів яких можна було тонко налаштувати і які мали більш високу роздільну здатність і швидкість.

Механічні кріплення та захист важливі для кожного датчика, що було враховано під час розробки найкращих сучасних промислових камер [35].

Інфрачервоні та тепловізійні камери

Інфрачервоні камери також іноді використовуються в науці та промисловості та є ще одним важливим компонентом системи збору даних. Інфрачервоні камери можуть визначати температуру в зоні видимості, що ідеально підходить для вимірювання без прямого контакту.

Експорт файлів даних з Dewesoft X за допомогою камери із синхронізацією аналогових даних, інфрачервоної та стандартної камери

Інфрачервоні випромінювання допомагають щодо несправностей на електростанціях, оскільки перегрів джерел живлення та генераторів, зазвичай, свідчить про наявність проблеми. При одному погляді дані з інфрачервоної камери легко визначити проблемні ділянки.

Той самий принцип застосовується при випробуванні автомобільного гальмівного механізму. Інфрачервоні камери дозволяють виміряти точну температуру гальм при їх експлуатації та виміряти точну швидкість нагрівання або охолодження в різних умовах. Такі камери все частіше використовуються в ADAS (сучасних системах допомоги водієві), оскільки допомагають автомобілю виявляти людей та інші джерела тепла, перш ніж вони потраплять у поле зору, особливо вночі.

Здатність «бачити» в іншому спектрі відкриває величезну кількість можливостей для багатьох випробувань і областей вимірювання. Найвідомішим виробником інфрачервоних камер є FLIR, і багато моделей тісно інтегровані в системи збору даних Dewesoft для збору безперервних термографічних даних в синхронізації з аналоговими і цифровими даними з датчиків, як показано в прикладі вище.

Високошвидкісні камери

Високошвидкісні камери потрібні для реєстрації явищ, що вкрай швидко змінюються. Ви напевно бачили уповільнену зйомку кульки, що лопається, або кулі, що пронизує склянку з водою, — такі відео були зняті на високошвидкісні камери.

Високошвидкісні камери Photron можуть захоплювати до 500 000 зображень за секунду. Ці дані зберігаються в оперативну пам'ять і відразу доступні для відтворення. Системи збору даних Dewesoft можна синхронізувати з камерами Photron, що дозволяє встановити для них одночасні тригери, а після завершення випробування високошвидкісне відео відразу передається в систему збору даних Dewesoft і автоматично синхронізується з іншими даними. Відеозапис можна відтворювати в ідеальній синхронізації з даними з інших датчиків.

Відео з випробування перемикача з плавким запобіжником з використанням обладнання та програмного забезпечення для збору даних Dewesoft

Камери забезпечують унікальний контекст для даних, що реєструються, підвищують ефективність інформації та аналізу при дослідженнях і випробуваннях.

Області застосування відеокамер [30]:

1. Промислові камери: автоматизація виробництва та контроль технологічного процесу; автомобільна галузь - вимірювання зовнішнього шуму ТС, випробування в аеродинамічній трубі, випробування гальмівних механізмів; аерокосмічна галузь - випробування поверхні управління, випробування рятувальних трапів, випробування двигунів.

2. Інфрачервоні камери: вимірювання електроенергії та живлення, ADAS (сучасні системи допомоги водієві).

3. Високошвидкісні камери: балістичні випробування, дослідження гідроаеродинаміки, випробування матеріалів, автомобільні краш-тести, випробування в аеродинамічній трубі.

Переваги відеокамер:

1. Промислові камери: захист від впливу навколишнього середовища IP67, синхронізація вихідних сигналів, швидкість до 600 кадрів в секунду, пряме порівняння даних датчиків із зображеннями об'єктів, що тестуються, змінні об'єктиви.

2. Інфрачервоні камери: безконтактне вимірювання температури, пряме порівняння даних датчиків з термічною картиною в реальному часі.

3. Високошвидкісні камери: захоплення зображень до 500 000 кадрів за секунду.

Недоліки відеокамер:

1. Промислові камери: дорожчі в порівнянні з веб-камерами.

2. Інфрачервоні камери: дорогі, не можуть працювати через скло.

3. Високошвидкісні камери: дуже дорогі, короткий час запису через високу частоту вибірки, вимагають багато зовнішнього світла на об'єкті або джерела постійного прямого світла.

Цифрові датчики

Говорячи про цифрові датчики, ми маємо на увазі датчики, які виводять дискретні значення, зазвичай пов'язані з лінійним або кутовим положенням, а також датчики, які використовуються для виявлення об'єктів поблизу. Розглянемо найпоширеніші цифрові датчики.

Датчик наближення

Датчик наближення здатний виявляти об'єкти поблизу безконтактним способом, а потім виводити імпульсні сигнали або сигнали напруги. Існує кілька типів датчиків наближення. Їх вибір залежить від складу об'єктів, що виявляються.

4.6 Датчики рівня

Вимірювання рівня рідин і сипучих тіл відіграє важливу роль при автоматизації технологічних процесів, особливо якщо підтримка рівня пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. Рівнеміри широко використовуються в харчовій, нафтовій та нафтопереробній промисловості, при виробництві медикаментів і харчових продуктів. Рівнеміри застосовуються або для контролю за відхиленням рівня від номінального і в цьому випадку вони мають двосторонню шкалу, або для визначення кількості речовини (у поєднанні з відомими розмірами ємності) і в цьому випадку вони мають односторонню шкалу. Велику групу становлять сигналізатори рівня, в яких вихідний сигнал виникає при досягненні рівнем верхнього або нижнього граничних значень [35].

Залежно від умов вимірювання, характеру контрольованого середовища використовуються різні методи вимірювання рівня. Якщо немає необхідності в дистанційній передачі показань, то рівень рідини можна вимірювати рівнемірами з візуальним відліком (вказівні скла). При необхідності дистанційного вимірювання рівня застосовуються більш складні рівнеміри: гідростатичні (дифманометричні і барботажні), валери й поплавкові, ємкісні, індуктивні, радіоізотопні, хвильові, акустичні, термокондуктометричні. Різноманітність принципів дії і конструктивних

виконань рівнемірів обумовлено їх використанням для вимірювання рівня води, розчинів і суспензій, нафтопродуктів, кордонів розділу середовищ, що містять суспензії, сипучих тіл в різних галузях народного господарства [34].

Вимірювання рівнів наповнення рідин у різних резервуарах та баках займають значне місце в різних галузях промисловості, науки та техніки.

Основними групами рівнемірів є [34]:

– візуальні (за допомогою водомірного скла);

– гідростатичні, в яких рівень визначають за значенням тиску рідини на дно резервуара з наступним вимірюванням різниці даного тиску та атмосферного за допомогою диференціального манометра;

– електромеханічні та механічні, зокрема поплавкові та буйкові;

– електричні, в яких рівень перетворюється в зміну електричного опору (кондуктометричні) або в зміну ємності (ємнісні).

Поплавкові та буйкові рівнеміри

У поплавкових рівнемірах є плаваючий на поверхні рідини поплавець, у результаті чого рівень, який вимірюється, перетворюється на переміщення поплавця. У таких приладах використовується легкий поплавець, виготовлений із корозійностійкого матеріалу [33].

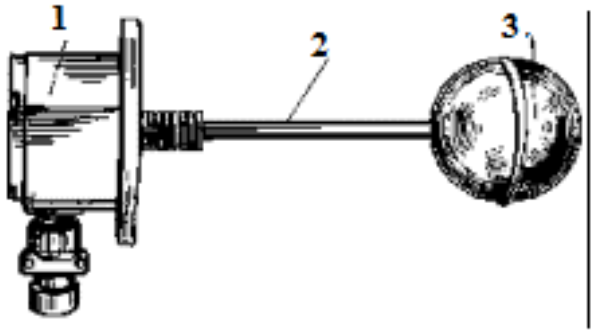
Поплавкові рівнеміри є одними з найбільш простих і надійних. Проте вони практично не можуть застосовуватися за високих тисків. Вони дозволяють контролювати рівень рідин у широкому діапазоні від 50 до 2000 мм. До таких сигналізаторів граничних значень контрольованих рівнів відносяться поплавкові прилади типів РРС (реле рівня сильфонне), СР (сигналізатор рівня), ДРР (дистанційне реле рівня).

На рисунку показано загальний вид приладу ДРР-1. Поплавець 3 (порожниста металева куля), сполучений початком 2 із мікровимикачем, знаходиться в контрольованій рідині. При досягненні максимального рівня на кулю 3 діє гранична уштовхуюча сила, що змушує шток 2 підніматися і переключати мікровимикач, який сигналізує про аварійний рівень [34].

Індикуючий пристрій сполучено з поплавцем тросом або за допомогою важелів. Поплавковими рівнемірами можна вимірювати рівень рідини у відкритих ємностях.

Основними несправностями у таких приладах є порушення герметичності кулі, корозія контактів перемикача внаслідок підвищеної вологості контрольованого середовища.

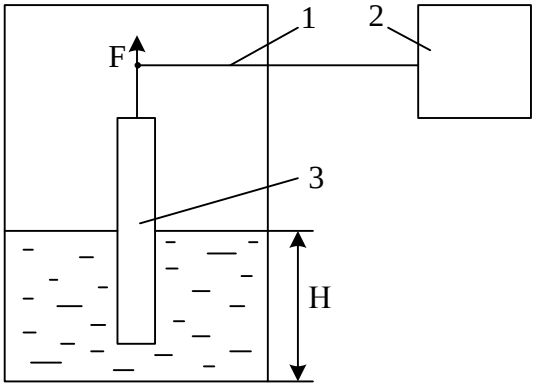
Мікроперемикач залежно від ступеня корозії підлягає ремонту або заміні на новий тип МП.



1 – корпус датчика з мікровимикачем; 2 – шток; 3 – поплавець

Рисунок 4.35 – Датчик-реле рівня типу ДРР-1

У буйкових рівнемірах застосовується нерухомий занурений у рідину буй 3. Принцип дії буйкових рівнемірів базується на тому, що на занурений буй діє з боку рідини виштовхуюча сила F. За законом Архімеда ця сила дорівнює вазі рідини, витиснутої буйком. Але кількість витиснутої рідини залежить від глибини занурення буя, тобто від рівня в ємності Н. Таким чином, у буйкових рівномірах рівень Н, який вимірюється, перетворюється на пропорційну йому виштовхуючу силу. Тому залежність виштовхуючої сили від рівня, який вимірюється, лінійна [34].



1 – важіль; 2 – проміжний перетворювач сили в уніфікований сигнал; 3 – буй

Рисунок 4.36 – Буйковий рівнемір

У буйкових рівнемірах РБ-П і РБ-Е (рівнеміри з пневмовиходу, та з електричним виходом відповідно) буй передає зусилля на важіль 1 проміжного перетворювача 2.Вихідний сигнал першого рівнеміра – уніфікований пневматичний, іншого – уніфікований електричний сигнал (постійний струм).

Принцип дії буйкових рівнемірів дозволяє в широких межах змінювати їх діапазон вимірювання. Це досягається як заміною буя, так і зміною передатного підіймаючого механізму проміжного перетворювача.

Застосування буйкових, а так само і поплавкових рівнемірів ускладнено в агресивних рідинах і середовищах з осадами, що випадають. Для дистанційного вимірювання рівня рідини застосовуються буйкові рівнеміри з уніфікованим електричним або пневматичним сигналом типів РБ-Е й РБ-П. Вимірювальні схеми рівнемірів побудовані за принципом компенсації зусиль [36].

Прилад РБ-П має пневматичний вихідний сигнал, що дозволяє підключати до нього манометричний реєструючий прилад (для відліку показань рівня).

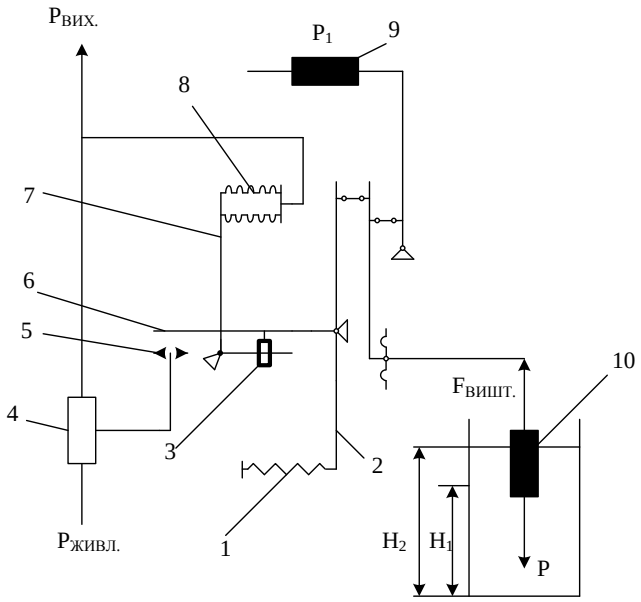


Рисунок 4.37 – Схема роботи рівнеміра РБ-П:
1 – пружина коректора; 2 – Т-подібний важіль; 3 – рухлива опора; 4 – пневмореле; 5 – сопло; 6 – заслінка; 7 – Г-подібний важіль; 8 – сильфон зворотного зв'язку; 9 – вантаж-противага; 10 – датчик-буй

Буй 10, занурений у рідину, через систему важелів урівноважений у визначеному положенні протидіючим вантажем Р1. При зміні рівня рідини змінюється сила, яка виштовхує поплавець. Внаслідок цього порушується рівновага вимірювальної системи "вантаж - противага" і на чутливому елементі зміна рівня перетворюється в пропорційне зусилля, що врівноважується зусиллям сильфона зворотного зв’язку 8. Цей тиск і є пневматичним вихідним сигналом рівнеміра, який змінюється в межах 0,02 – 0,1 МПа.

Самостійно як вимірювач рівня рівнемір РБ-П не застосовується, а використовується як датчик [33].

Ємнісні рівнеміри

Ємнісні рівнеміри відрізняються універсальністю, високою чутливістю, простотою вимірювального кола, відсутністю рухомих елементів в зоні вимірюваного рівня [5].

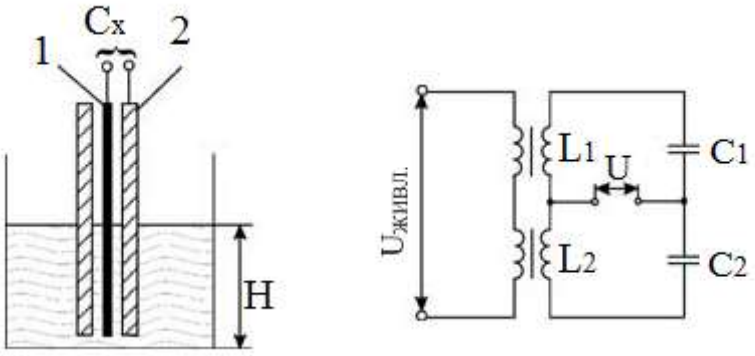
Ємнісні рівнеміри використовують для вимірювання рівня зміни ємності вимірювального перетворювача, викликаного зміною рівня рідини. Рівнеміри такого типу можуть застосовуватися для вимірювання як неелектропровідних, так і електропровідних рідин. Вони придатні для вимірювання рівня в широкому діапазоні тисків і температур агресивних і неагресивних середовищ. Їх показання залежать від діелектричної проникності середовища, яка може змінюватися з температурою. Застосування компенсаційних ємностей дозволяє істотно зменшити цей вплив, але не виключає його цілком. Електронна схема ємнісних рівнемірів достатньо складна, що обмежує їх широке поширення.

Найпростіший первинний перетворювач ємнісного приладу являє собою електрод 1 (металевий стрижень або провід), розташований у вертикальній металевій трубці 2. Стрижень разом із трубою утворюють конденсатор. Ємність такого конденсатора залежить від рівня рідини, тому що при його зміні від нуля до максимуму діелектрична проникність буде змінюватися від діелектричної проникності повітря до діелектричної проникності рідини.

Вимір електричної ємності первинного перетворювача Сх виконується незрівноваженим мостом перемінного струму, плечами якого є індуктивності L1 і L2 і ємність первинного перетворювача Сх. При зміні рівня змінюється ємність Сх, що призводить до зміни вихідної напруги моста V [35].

Ємнісні рівнеміри можуть вимірювати рівень не тільки рідин, але і твердих сипучих матеріалів: цементу, вапна і т.п.

Для підвищення чутливості ємнісних сигналізаторів рівня електроди встановлюють у горизонтальному положенні. У цьому випадку похибка виміру не перевищує 3 мм.



а) б)

Рисунок 4.38 – Ємнісний рівнемір:
а – будова датчика; б – електрична схема рівнеміра

Рівнеміри з візуальним відліком

Найпростішими приладами для вимірювання тиску є рівнеміри з візуальним відліком. Такі рівнеміри базуються на візуальному вимірі висоти рівня рідини. За невисоких тисків середовища висота рівня вимірюється у скляній трубці (вказівному склі), яка сполучається з рідинним і газовим просторами контрольованого резервуара. За підвищених тисків застосовуються плоскі стекла, на поверхні яких із боку рідини нанесені вертикальні грановані канавки. З умов міцності не рекомендується застосовувати вказівні стекла довжиною більше 0,5 м, тому при великому діапазоні зміни рівня встановлюється декілька стекол у шаховому порядку таким чином, щоб їхні діапазони вимірювання перетиналися [34].

Основним джерелом додаткової похибки таких рівнемірів є різниця щільностей рідини в контрольованому резервуарі та у склі, що викликається розходженням температур (особливо якщо рідина в резервуарі знаходиться за високої температури, а вказівне скло знаходиться на значному віддаленні). Розходження щільностей призводить до розходження рівнів у резервуарі і вказівному склі (рівень у склі іноді називають “ваговим” рівнем).

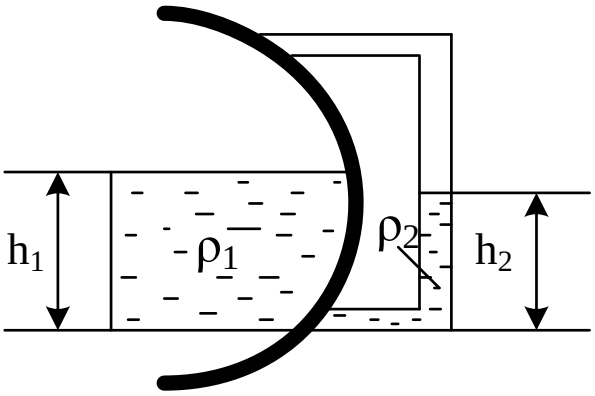


Рисунок 4.39 – Схема рівнеміра з візуальним відліком

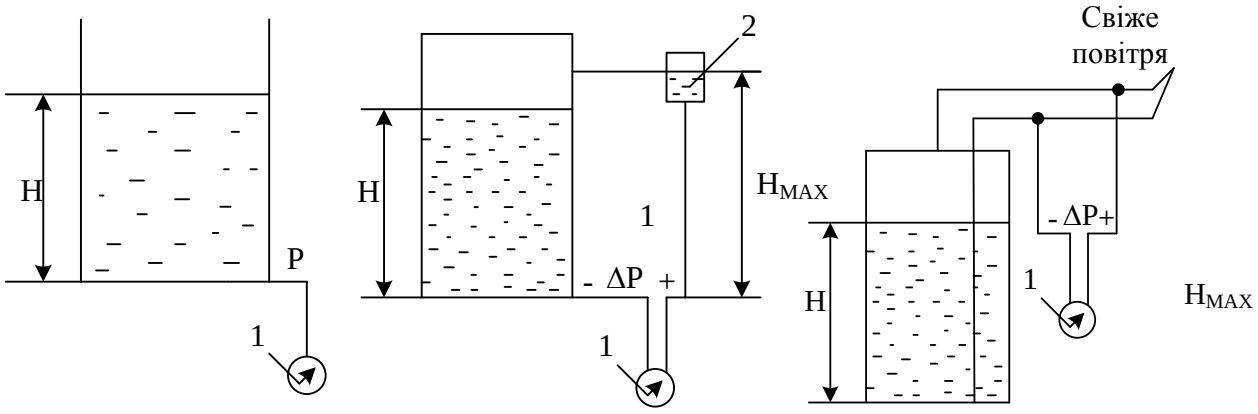
Похибка може досягати істотних значень, тому з метою її зменшення необхідна або теплова ізоляція рівнеміра, або продування його рідиною з резервуара перед відліком.

Гідростатичні рівнеміри

Гідростатичний метод вимірювання рівня базується на тому, що в рідині існує гідростатичний тиск, пропорційний глибині, тобто відстані від поверхні рідини. Тому для вимірювання рівня гідростатичним методом можуть бути використані прилади для вимірювання тиску або перепаду тисків. Як такі прилади звичайно застосовують дифманометри.

При вмиканні дифманометра, перепад тисків на ньому буде дорівнювати гідростатичному тиску рідини, що пропорційно рівню Н, який вимірюється.

Якщо рідина в ємності знаходиться під надлишковим тиском, то дифманометр 1 включають за схемою, причому його плюсову камеру з'єднують із простором над рідиною через порівнювальну посудину 2. Цю посудину заповнюють рідиною, стовп якої створює постійний гідростатичний тиск у плюсовій камері дифманометра [35].



а) б) в)

Рисунок 4.40 – Вимір рівня дифманометрами:
а – у відкритій ємності; б – у ємності під тиском; в – для суспензій і шламів; 1 – дифманометр; 2 – зрівняльна судина

Оскільки вимірюється перепад тисків, рівний різниці гідростатичних тисків рідини в камерах дифманометра, вимірюваний рівень буде пропорційний різниці між рівнем у розділювальній судині H_{max} і рівнем, який вимірюється Н. Оскільки рівень у розділювальній судині постійний і відомий, то його завжди можна врахувати в показаннях приладу. При вимірюванні рівня агресивних рідин дифманометр захищається розділювальними посудинами або мембранними роздільниками, що дозволяє заповнити його камери і трубки неагресивною рідиною.

При вимірюванні рівня суспензій і шламів осади можуть забивати імпульсні трубки дифманометрів, їх безупинно продувають стиснутим повітрям. У цьому випадку дифманометр 1 включають за схемою. Імпульсні трубки увесь час заповнені повітрям для продуття. За невеликої витрати повітря його тиск у мінусовій камері стає рівним тиску над рідиною в ємності, а в плюсовій – тиску в рідині. Тому перепад тисків у дифманометрі буде дорівнювати гідростатичному тиску рідини і, отже, буде пропорційний рівню, що вимірюється.

Радіоізотопні рівнеміри

Такі рівнеміри застосовують для вимірювання рівня рідин і сипучих матеріалів у закритих ємностях. Їх дія базується на поглинанні γ-променів при проходженні через прошарок речовини.

Радіоізотопні рівнеміри встановлюються поза апаратом або установкою. Вони не мають безпосереднього контакту з середовищем, параметри якого вимірюються, і це є їх принциповою перевагою в порівнянні з іншими методами.

У радіоізотопному рівнемірі джерело 2 і приймач 10 випромінювання підвішені на сталевих стрічках 3, на яких вони можуть переміщатися у трубах 11 по усій висоті бака 1. Стрічки намотані на барабан 5, що приводиться у рух реверсивним електродвигуном 7.

Якщо вимірювальна система (джерело і приймач γ – променів) розташована вище рівня середовища, поглинання випромінювання слабке і від приймача 10 по кабелю 9 на блок керування 8 буде приходити сильний сигнал. За цим сигналом електродвигун 7 одержить команду на спуск вимірювальної системи. При зниженні її нижче рівня середовища поглинання γ –променів різко збільшиться, сигнал на виході приймача зменшиться й електродвигун почне піднімати вимірювальну систему [35].

Таким чином, положення вимірювальної системи буде відслідковувати рівень у ємності (точніше вона буде знаходитися в безупинному коливанні коло рівня, що вимірюється). Це положення у вигляді кута повороту ролика 4 перетворюється вимірювальним пристроєм 6 на уніфікований сигнал – напругу постійного струму U.

Радіоізотопні рівнеміри типу УР-8 можуть вимірювати рівень у ємностях висотою до 10 м.

Аналогічний принцип використаний у радіоізотопному сигналізаторі рівня ГР-8, джерело і приймач випромінювання якого закріплюють зовні ємності на необхідній висоті. При досягненні середовищем цього рівня включається сигнальний пристрій.

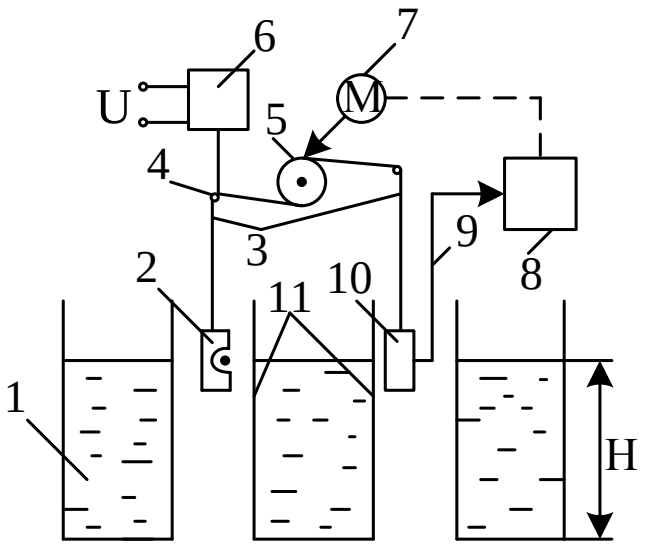
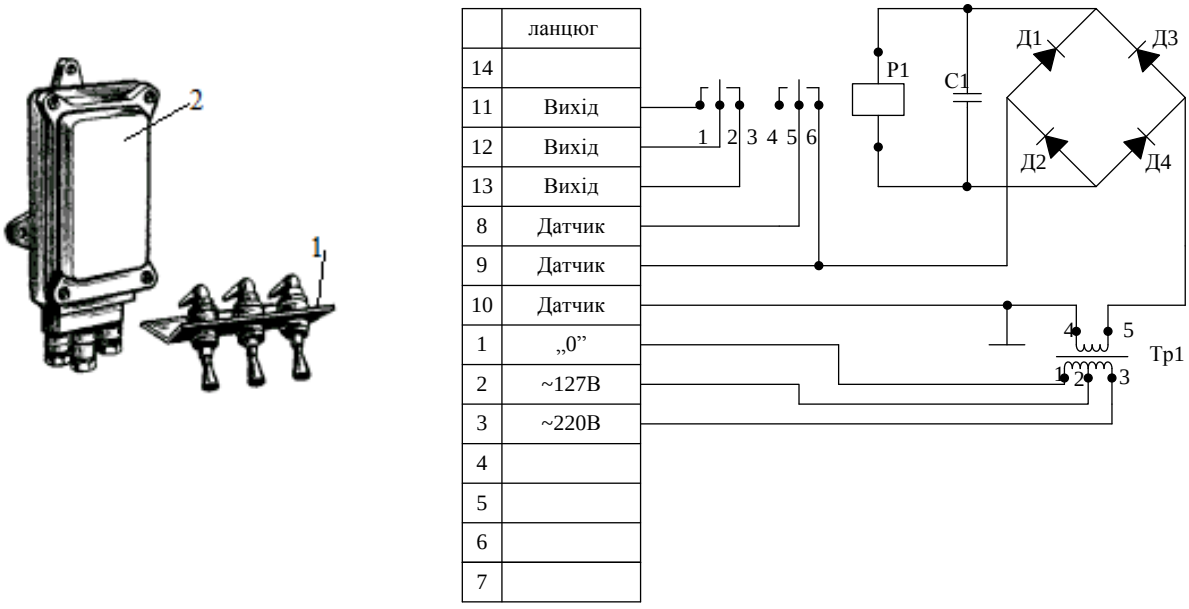


Рисунок 4.41 – Радіоізотопний рівнемір

1 – бак; 2 – джерело випромінювання; 3 – сталеві стрічки; 4 – ролик; 5 – барабан; 6 – вимірювальний пристрій; 7 – реверсивний електродвигун; 8 – блок керування; 9 – кабель; 10 – приймач випромінювання; 11 – труби

Електричні реле рівня типу РУ-Е3 дозволяють контролювати одночасно три рівні середовища – нижній, середній і верхній. На платі 1 монтуються всі три датчики рівня; відстань між рівнями вибирається залежно від місцевих умов. Блок 2 являє собою електричну схему реле.

Електрична схема приладу включає трансформатор Тр1, випрямляч Д1–Д4, реле сигналізації Р1 і затискачі для підключення датчиків. Датчики – сталеві стрижні з нержавіючої сталі Х18Н9Т – підключаються на затискачі 8, 9, 10 (відповідно нижній, середній і верхній).



а) б)

Рисунок 4.42 – Реле рівня РР-Е3

а) загальний вигляд: 1 – плата, 2 – блок; б) електронна схема

Ультразвукові й акустичні рівнеміри

Принцип дії рівнемірів цього типу базується на вимірюванні часу проходження імпульсу ультразвуку від випромінювача до поверхні рідини та назад. При прийомі відбитого імпульсу випромінювач стає датчиком. Якщо випромінювач 1 розташований над рідиною, рівнемір називається акустичним; якщо усередині рідини – ультразвуковим. У першому випадку час, який вимірюється, буде тим більше, чим нижче рівень рідини Н, у другому – навпаки.

Електронний блок 2 призначений для формування ультразвукових імпульсів, посилення відбитих імпульсів, вимірювання часу проходження імпульсом подвійного шляху (у повітрі або рідині) і перетворення цього часу в уніфікований електричний сигнал. Наприклад, акустичний рівнемір ЕХО-1 використовується для вимірювання рівня неоднорідних рідин (із перемінною

за висотою щільністю), які кристалізуються і випадають в осад, у баках висотою до 3 м і має вихідний сигнал увиді постійного струму [30].

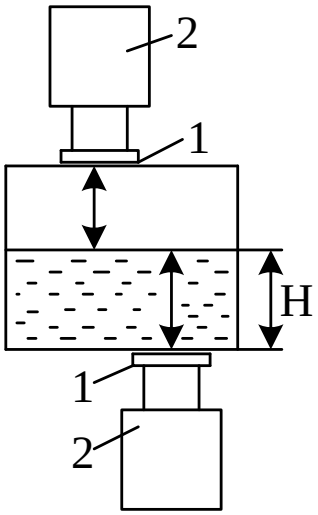


Рисунок 4.43 – Ультразвуковий і акустичний рівнеміри
1 – випромінювач; 2 – електронний блок

За принципом дії акустичні рівнеміри можна поділити на локаціонні, поглинання і резонансні.

У локаціонних рівнемірах використовується ефект відбивання ультразвукових коливань від межі розподілу рідина – газ. Положення рівня визначається за часом проходження ультразвукових коливань від джерела до приймача після відбиття їх від поверхні розподілу. У рівнемірах поглинання положення рівня визначається за ослабленням інтенсивності ультразвуку при проходженні через прошарки рідини і газу. У резонансних рівнемірах вимір рівня виконується за допомогою вимірювання частоти власних коливань стовпа газу над рівнем рідини, яка залежить від рівня рідини.

Найбільшого поширення одержали локаціонні рівнеміри. Локація рівня може виконуватися або через газове середовище над рідиною (такі рівнеміри іноді називають акустичними), або знизу через прошарок рідини (такі рівнеміри іноді називають ультразвуковими). Похибкою першого роду рівнемірів є похибка від залежності швидкості ультразвуку від тиску і

температури газу і сильне поглинання ультразвуку газом, що потребує більшої потужності джерела, ніж при локації через рідину.

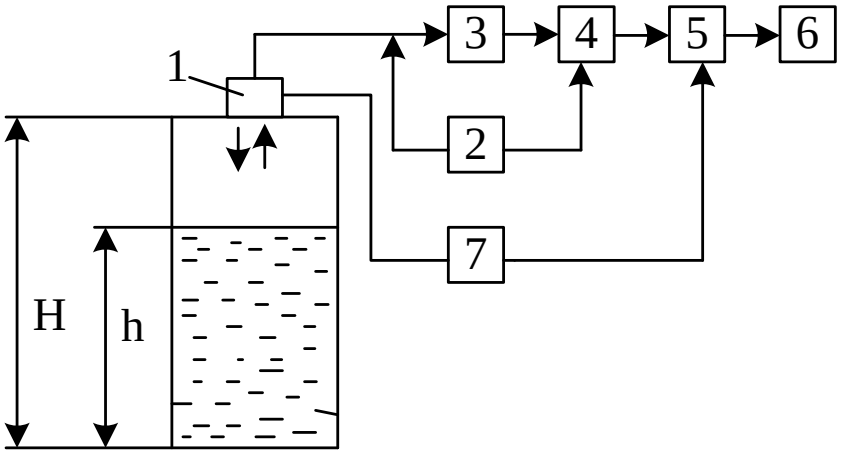


Рисунок 4.44 – Схема акустичного рівнеміра ЕХО-1

Проте на показання таких рівнемірів не впливає зміна характеристик рідини, тому такі рівнеміри можуть бути використані для вимірювання рівня неоднорідних рідин, які містять бульки газу або кристалізуються. Такі рівнеміри використовуються для рідин, які мають температуру не вище 80 °С і тиск не більше 4 МПа.

Рівнеміри з локацією через рідину можуть бути використані для середовищ під високим тиском, для них потрібна невеличка потужність джерела, проте вони чутливі до "домішок" у рідину, наприклад до бульбашок газу при вскипанні. Тому такі рівнеміри застосовуються для однорідних рідин. Крім того, вони також чутливі до зміни температури і тиску середовища через залежність від них швидкості поширення ультразвуку в рідині. Джерелом і одночасно приймачем відбитих ультразвукових коливань є п’єзоелемент, вмонтований в акустичний перетворювач 1. Локація здійснюється ультразвуковими імпульсами, які збуджуються п’єзоелементом, шляхом подачі на нього електричних імпульсів від генератора 2. Одночасно генератор включає схему вимірювання часу 4. Відбитий ультразвуковий

імпульс повертається на п’єзоелемент через час t, який відповідає контрольованому рівню відповідно до виразу:

$$t = 2(H - h)/c$$

де с – швидкість ультразвуку в газі.

П’єзоелемент перетворює відбитий ультразвуковий імпульс на електричний сигнал, який посилюється підсилювачем 3 і подається на схему вимірювання часу 4. Перетворювач 5 перетворює значення часу на уніфікований вихідний сигнал 0–5 м, який вимірюється повторним приладом 6.

Для зменшення впливу зміни температури газу є блок температурної компенсації 7, що включає в себе термометр опору, розташований усередині акустичного перетворювача. Рівнемір ЕХО-1 може мати діапазони вимірювання 0-1, 0-2, 0-3 м; клас точності рівнеміра 2,5 [30].

Основна похибка рівнемірів із локацією через рідину не перевищує 2,5% діапазону вимірювання рівня.

Прилади даної групи застосовуються за особливо важких умов, наприклад: токсичні або агресивні середовища, високий тиск, висока температура.

Термокондуктометричні рівнеміри

Термокондуктометричними називають рівнеміри, елементом електричного ланцюга яких є резистор, який нагрівається струмом, із великим температурним коефіцієнтом електроопору, електричний опір якого залежить від рівня рідини. Принцип дії таких рівнемірів базується на розходженні умов теплообміну в рідинах і газах.

Чутливий елемент таких рівнемірів являє собою протяжний терморезистор, електричний опір якого визначається його температурою. Звичайно вони виготовляються з платини або вольфраму, причому чутливість перетворювача збільшується із зростанням температурного коефіцієнта електроопору матеріалу. Термокондуктометричний

перетворювач поміщається в резервуар таким чином, що частина його знаходиться в рідині, інша частина – у газовому просторі. При зміні рівня змінюється довжина цих ділянок.

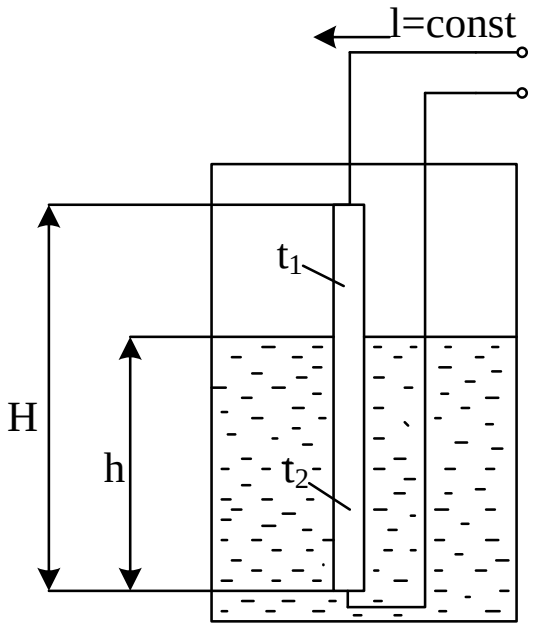


Рисунок 4.45 – Схема термокондуктометричного перетворювача рівня

Принцип дії термокондуктометричного перетворювача полягає у використанні розходження тепловіддачі від нагрітого терморезистора до рідини і газу, унаслідок чого ділянки його, що знаходяться в рідині і газі, мають різноманітну температуру і, отже, різноманітний опір. Таким чином, сумарний їхній опір буде визначатися рівнем [35].

Пневматичні рівнеміри. Пневматичні рівнеміри знаходять широке застосування для вимірювання рівня агресивних рідин.

У цьому методі висоту рівня рідини вимірюють так званим способом барботування газу. У рідину, рівень якої слід виміряти, занурюють трубку, у якій через невеличкий дросель безупинно нагнітається стиснуте повітря або захисний газ, наприклад азот. Пневматичний тиск, що встановлюється в заглибленій трубці за дроселем, відповідає гідростатичному тиску над кінцем трубки і є тою самою мірою рівня заповнення резервуара. Діаметр заглибної

трубки вибирають рівним 8-15 мм, керуючись насамперед в’язкістю рідини, яка не повинна перевищувати 60Е. Матеріал заглибної трубки повинен бути обраний відповідно до хімічних і фізичних властивостей рідини, рівень якої вимірюється.

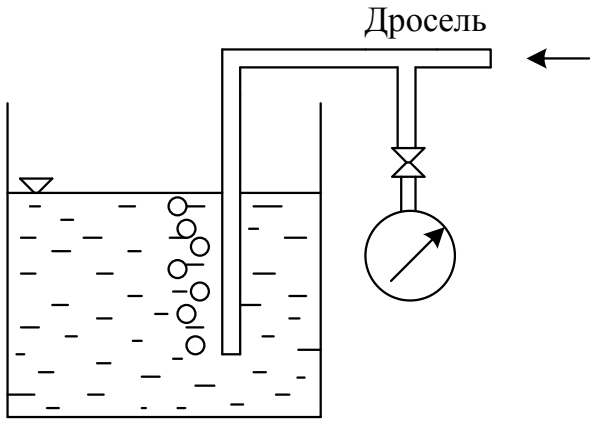


Рисунок 4.46 – Пневматичний рівнемір для вимірювання рівня рідини у відкритих резервуарах

Істотною перевагою пневматичних рівнемірів є практична незалежність їхніх показань від температурного режиму сполучних ліній.

4.7 Датчики температури

Зважаючи на те, що умови та діапазони вимірювань для різних завдань можуть сильно відрізнятися, а вимоги до вимірювання різних температурних параметрів бути різними, відповідно, і для виконання тих чи інших завдань термоперетворювач повинен відповідати цим умовам та певним вимогам. Тому вони можуть бути різними та використовувати в роботі різні властивості матеріалів. Таким чином, датчики бувають [36]:

- напівпровідникові;
- терморезистивні;
- акустичні;
- термоелектричні;
- п'єзоелектричні;
- пірометри.

Коротко опишемо особливості кожного з них, щоб можна було уявляти, у яких випадках необхідно використовувати той чи інший прилад.

Напівпровідникові термоелектричні

Термоперетворювачі цього затребувані у виробництвах, оскільки є недорогими і досить точними приладами з низькою похибкою. Під впливом температури такий датчик реєструє зміни у властивостях p-n переходу. Тут може використовуватися практично будь-який діод або біполярний транзистор. Висока точність напівпровідникових термодатчиків досягається рахунок залежності напруги на транзисторі від абсолютної температури.

Рисунок 4.47 – Терморезистивні термоелектричні перетворювачі

Основними позитивними сторонами подібних термодатчиків є їхня довговічність, стабільність і висока чутливість. Вони чудово вписуються практично у будь-яку схему.

Робота таких термоперетворювачів полягає в зміні опору під впливом температури на провідник чи напівпровідник. Простіше кажучи, вони містять у своїй конструкції терморезистор, який реагує на зміну середовища.

Залежно від матеріалу, який використовується в терморезистивних термодатчиках, їх поділяють на:

1. Кремнієві резистивні, які відрізняються довготривалою стабільністю та високою точністю.

2. Резистивні детектори температури, що відрізняються високою стабільністю, міцністю та точністю. В основі їх роботи закладена здатність металів змінювати свій опір при дії температури. Найчастіше в таких

датчиках використовують платину або мідь, а при контролі особливо високих температур – вольфрам. Єдиним недоліком є відносно висока вартість.

3. Робота термісторів ґрунтується на використанні металооксидних сполук. Застосовують лише для вимірів абсолютних температур. Основним з мінусів можна виділити необхідність калібрування та недовговічність [35].

Рисунок 4.48 – Акустичні безконтактні пристрої

Такий тип температурного датчика застосовується переважно вимірювання високих температур. Принцип дії їх заснований на зміні характеристик звуку за різних температур. Складається такий термодатчик із приймача та випромінювача. Звук, проходячи через досліджуване середовище, потрапляє у приймач, де фіксуються його параметри, і основі визначається температура.

Акустичні термодатчики часто використовуються в медицині та там, де неможливо виміряти температуру контактними способами. Одним з основних недоліків є низька точність вимірюваних температур і висока похибка внаслідок додаткових особливостей [34].

Термоелектричні датчики

Термоелектричні датчики, або, простіше кажучи, термопари відрізняються широким спектром показників, що вимірюваються - від -200 до 2200 градусів Цельсія. У цьому їх можливості залежить від використаних матеріалів. Так, термопари з неблагородних металів дозволяють вимірювати температуру до 1100 °С, з благородними до 1600 °С, а для виміру особливо

високих терморежимів використовуються термопари з тугоплавкими металами типу вольфраму.

Принцип роботи термоелектричних датчиків заснований на ефект Зеєбека, тобто використовуються спаї різнорідних металів, що утворюють замкнутий контур, в якому виникає електричний струм, коли місця спаїв мають різну температуру. Складається термопара з двох кінців: робочий та вільний. Перший занурюється безпосередньо у робоче середовище, а другий ні. Таким чином, виникає різниця температур, що відображається у вигляді вихідної напруги, яка фіксується мультивольтметром, що часто входить у комплект з термоелектричним датчиком [34].

Рисунок 4.49 – П'єзоелектричні кварцові прилади

Принцип роботи датчика температури п'єзоелектричного ґрунтується на використанні кварцового п'єзорезонатора. П'єзоматеріал, що використовується в ньому, виконує роль резонатора. Коли на нього подається електричний струм, цей матеріал починає коливатися при дії різних терморежимів, і частота коливань також змінюється, що і покладено в основу п'єзоелектричних датчиків.

Безконтактні термоперетворювачі пірометри

Безконтактні датчики, які здатні фіксувати теплове випромінювання від нагрітих тіл, називаються пірометрами. Зручність подібних приладів полягає в тому, що немає потреби поміщати його безпосередньо в середу. Однак без прямого контакту точність їх показань щодо низька, адже тут можуть бути побічні явища, що впливають на показання.

Рисунок 4.50 – Пірометр

Існує три типи пірометрів:

1. Інтерферометричні пірометри випускають два промені, які проходять один через середу, а другий контрольний. Два цих промені потрапляють на кремнієвий чутливий елемент, після чого порівнюється заломлення і довжина променів, які безпосередньо залежать від нагрівання середовища.

2. Флуоресцентні термодатчики працюють за складнішим принципом: на поверхню, де необхідно виміряти кількість тепла, наносяться компоненти на основі фосфору. Після цього об'єкт піддається ультрафіолетовому імпульсному випромінюванню, у результаті відбуваються певні реакції, а випромінювання піддається аналізу.

3. Датчики, які містять розчини, здатні змінювати фарбування під впливом температур. Хлорид кобальту, застосовуваний у подібних пірометрах, при контакті з вимірюваним середовищем здатний змінювати колірний спектр залежно від ступеня нагріву. Таким чином, величина світла, що проходить через розчин дозволяє вимірювати необхідні термопараметри.

Всі перераховані вище датчики чудово виконують свої функції в заданих межах. Однак треба розуміти, що вибирати і використовувати їх необхідно, виходячи з вимог у конкретно взятому випадку.

Тому при виборі того чи іншого термоперетворювача варто приділяти увагу наступним моментам [33]:

1. Розмір температурного спектра.

2. Можливість занурити датчик у середовище, що вимірюється. Якщо така можливість відсутня, варто вдатися до допомоги пірометрів або акустичних датчиків.

3. Умови вимірювання є одним із найважливіших моментів при виборі датчика. Тут варто враховувати не тільки агресивність середовища, але й такі параметри, як: тиск, вологість тощо.

4. Природа вихідного сигналу завжди повинна враховуватися. Адже одні термоперетворювачі можуть одразу перерахувати сигнал у градуси, а інші видають його лише у величині струму.

5. Деякі датчики досить нестабільні та недовговічні, що також варто брати до уваги. Тому якщо потрібна тривала робота без заміни та калібрування, то цей нюанс також має бути врахований.

6. Не зайвим буде при виборі датчика під певні потреби звертати увагу і на час спрацьовування, роздільну здатність та похибку, робочу напругу живлення, тип корпусу.

Рисунок 4.51 – Промислові датчики температури

Численні технологічні процеси, що вимагають контролю за температурою, займають у промисловості аж ніяк не останнє місце. Вимірювання температури газів, рідин, сипучих порошків і твердих

поверхонь, – для кожного з цих випадків характерні свої особливості, і для проведення коректних вимірювань важливо, щоб і метод вимірювання відповідав. Температурних датчиків, створених з урахуванням різних фізичних законів, і застосовуваних цих цілей, існує безліч. Зустрічаються як спеціальні, і універсальні датчики [30].

Найбільш широко в промисловості сьогодні поширені термоелектричні датчики, здатні працювати в інтервалі температур від -200 до +2500°С і навіть вище. Це надійні високоточні пристрої, які часто застосовуються для автоматичного контролю над процесами.

В основі роботи першого типу таких датчиків – термопар лежить явище виникнення термоЕРС у провіднику, кінці якого мають різну температуру. Термопара, поєднана з електровимірювальним приладом, утворює термоелектричний термометр.

Конструктивно термопари можуть бути виконані по-різному:

- неізольована токопроволочная з відкритим контактом;

- ізольована із відкритим контактом;

- на самоклеючій основі; у керамічній оболонці; у керамічному корпусі із вбудованими клемами.

Кожен варіант виконання зручний для вирішення конкретних завдань.

Рисунок 4.52 – Неізольована термопара

Наприклад, неізольована термопара застосовується при температурах до 2300°С, і використовується в біофізиці та медицині для точкових вимірювань, але не підходить для рідких та агресивних середовищ. Ізольована термопара з відкритим контактом може вимірювати температуру до 500°С, і вже підходить для вимірювання температур поверхонь і газів, оскільки оболонка зі скла або тефлону дає їй хімічну і термічну стійкість.

Ізольована термопара на самоклеючій основі підійде для діапазону від -60 ° С до +175 ° С, і зручна для кріплення на різні поверхні. Ізольована термопара в керамічній оболонці стійка до стирання, має гнучку конструкцію, і може використовуватися в термоустановках, термопечах та верстатобудуванні при температурах до 1100°С.

Промислові термопари в керамічному корпусі з вбудованими клемами призначені для установки в гільзу, мають корозійну стійкість, і тому придатні для важких промислових умов і вимірювання температур до 1150°С, причому з такою термопарою можуть використовуватися різні типи гільзи [30].

Рисунок 4.53 – Промислова термопара

Другим поширеним типом промислових температурних датчиків є датчики з урахуванням явища зміни опору провідника за зміни його температури – термометри опору. У комплект такого приладу входить чутливий елемент, вимірювальний прилад та з'єднувальні дроти.

Перший варіант виконання чутливого елемента – металевий дріт із міді або платини, який намотаний на каркас із ізоляційного матеріалу, і поміщений у захисний кожух. Такі термометри опору підходять для вимірювання температур від -200 до +700°С.

Другий варіант – напівпровідниковий чутливий елемент із суміші оксидів марганцю, міді, нікелю, магнію, кобальту тощо. Суміш подрібнюється і спікається разом із сполучними добавками, вийдуть своєрідний термістор у формі невеликої шайби, циліндра або намистинки, в торці якого запалюються контакти. Промислові термістори, що серійно виготовляються, можуть застосовуватися для вимірювання температур від -90°С до 180°С.

Кожен із типів датчиків має свої унікальні властивості, що дозволяють вирішувати конкретні завдання якнайкраще. Так, термометри опору на основі платини мають дуже високу стабільність і точність. Термістори доступні за ціною і при цьому дуже чутливі, а термопари, у свою чергу, стійкі до різних умов зовнішнього середовища, точні та стабільні в широкому температурному діапазоні.

Термопари існують завдяки такому явищу, як контактна різниця потенціалів. Якщо два різних твердих провідника або напівпровідника привести до щільного контакту один з одним, то в околиці місця їхнього дотику утворюються розділені електричні заряди. При цьому на зовнішніх кінцях даних провідників виникне різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів виявиться дорівнює різниці робіт виходу для кожного металу, поділеної на заряд електрона [30].

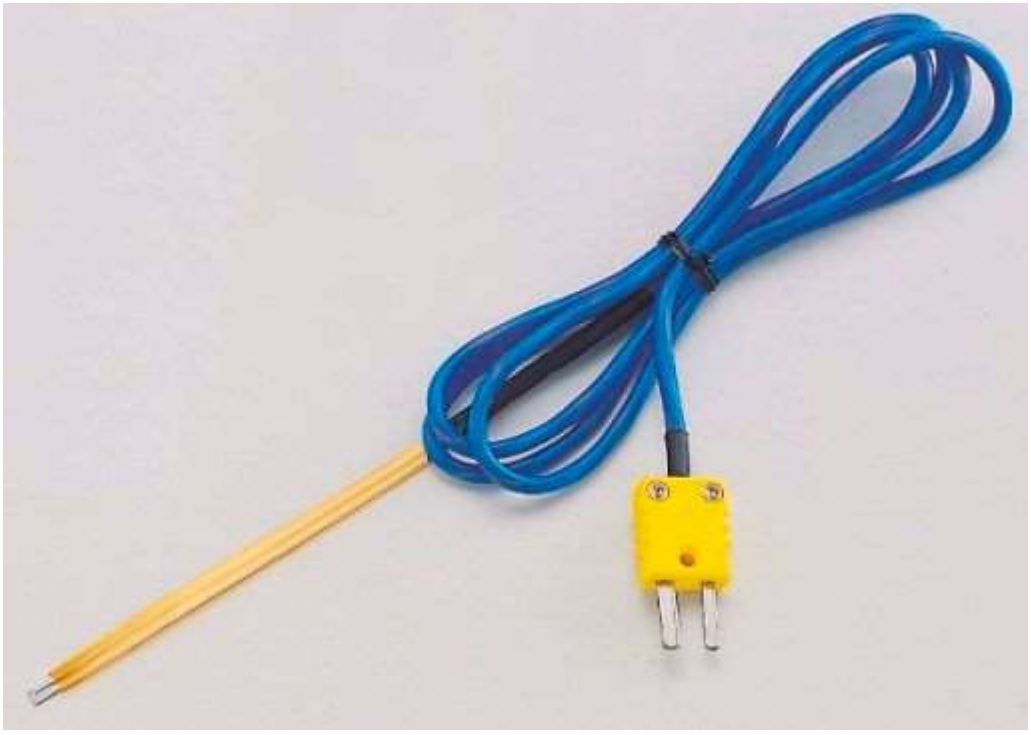


Рисунок 4.54 – Термопара

Зрозуміло, що якщо зімкнути таку пару в кільце, то результуюча ЕРС дорівнюватиме нулю, а якщо з одного боку її все ж таки залишити розімкнутою, то матиме місце реальна ЕРС, величиною від десятих вольта до одиниць вольт, залежно від того, що це за матеріали.

Звичайно, вольтметром виміряти контактну різницю потенціалів не вдасться, однак на вольт-амперній характеристиці вона себе проявить, наприклад вона проявляє себе в транзисторі і в діоді на p-n переході.

Суть у тому, що при зіткненні, наприклад, двох металів, система виходить з рівноваги тому що хімічні потенціали цих двох металів не рівні один одному, в результаті відбувається дифузія електронів у бік зменшення їхньої енергії, що в свою чергу призводить до зміни заряду електричного потенціалу наведених у контакт металів. Так у приконтактній області починається зростання електричного поля, і як наслідок ми маємо те, що маємо.

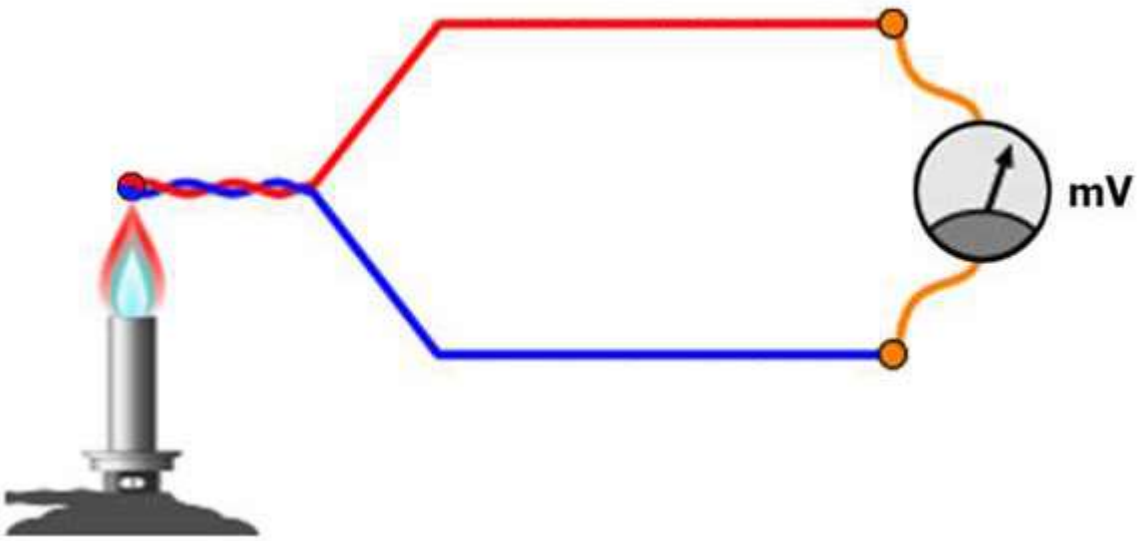


Рисунок 4.55 – Принцип дії термопари

Якщо тепер знову розглянути два ці провідники з різних металів, тільки замкнутих у кільце, коли сумарна ЕРС по замкнутому контуру дорівнюватиме нулю, то тут вийде два контактні місця. Назвемо ці місця спаями.

Отже, є два спаї двох різних провідників. Що якщо спробувати підігріти один із спаїв, а другий залишити за кімнатної температури? Очевидно, що оскільки з'єднані метали різні, і в кожному спаї є контактна різниця потенціалів, то спаї будуть відчувати різне відхилення ЕРС, перебуваючи при різних температурах.

Експеримент доводить, що різниця потенціалів між спаями буде пропорційна різниці їх температур, тому можна ввести коефіцієнт пропорційності, який називають термо-ЕРС. Для різних термопар термо-ЕРС буде різним [30].

Якщо в розрізі такого кільця виміряти напругу, то в певному інтервалі температур воно виявиться майже строго пропорційним різниці температур спаїв. І навіть якщо залишити тільки один спай (як на малюнку), і лише його підігрівати, а напругу вимірювати між двома кінцями, що знаходяться при

одній кімнатній температурі, то все одно можна виявити дуже чітку залежність ЕРС від поточної температури спаю. Так і працюють термопари.

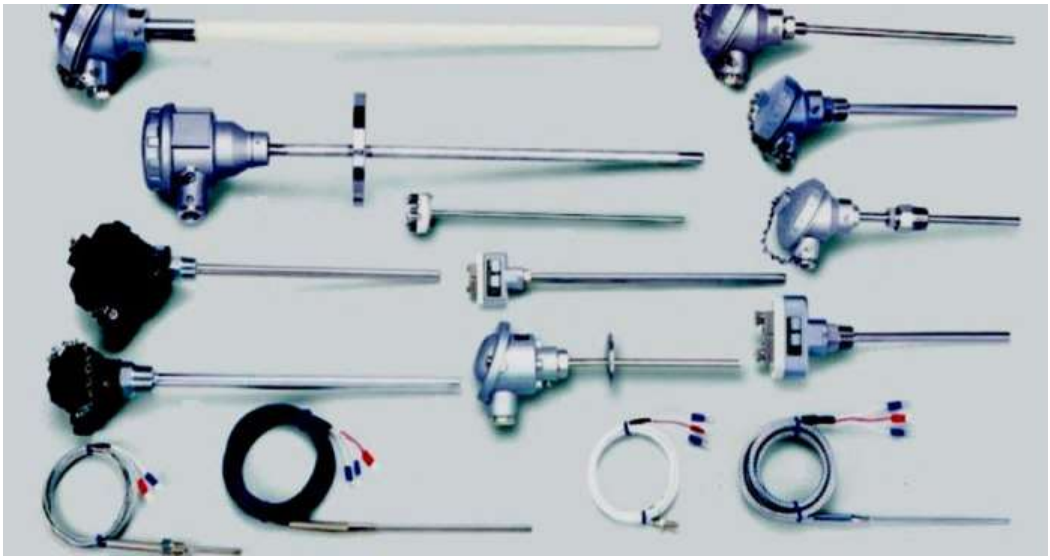


Рисунок 4.56 – Термопари

Описане явище відноситься до термоелектричних, а сам ефект, на базі якого працюють усі термопари, називається ефектом Зеєбека, на честь його першовідкривача - Томаса Зеєбека. Сьогодні можна зустріти промислові термопари, у яких, залежно від необхідного діапазону температур, що вимірюється, електроди виготовляють із спеціально підібраних сплавів.

Наприклад термопари зі сплавів хромель і алюмель мають коефіцієнт термо-ЕРС, що дорівнює 40 мікровольт на °С, і призначені для вимірювання температур у діапазоні від 0 до +1100°С. А пара мідь-константан, настільки популярна як демонстраційна допомога, дозволяє вимірювати температури від -185 до +300°С.

Її термо-ЕРС сильно залежить від конкретної різниці температур, тому для оцінки її параметрів зручно користуватися таблицею, наприклад при температурі холодного спаю в 0°С, при різниці температур в 100 градусів, різниця потенціалів мідно-константанової пари приблизно дорівнює 4,25мВ.

4.8 Датчики положення

Індуктосини. Індуктосин – це богатополюсний обертовий

трансформатор з друкованими обмотками. Основним елементом у індуктосині є два диска з електроізоляційного матеріала або метала з електроізоляційним покриттям. Один з дисків (ротор) з'єднаний з валом, положення якого контролюється, а другий (статор) закріплений. Відносно один до одного диски розташовані на однієї осі паралельно.На суміжні поверхні дисків нанесені друковані обмотки складені з плоских провідників.Електромагнитний зв'язок між обмотками здійснюється за рахунок магнітного потока, який проходить крізь повітряний зазор.Індуктосини мають дуже велику точність (одиниці кутових секунд), але дуже низкий вихідний сигнал [31].

Редуктосини. Багатополюсний бесконтактний обертовий трансформатор – індукційний редуктосин складається з статора, який має багато зубців і який зібрано з пластин електротехнічної сталі, та ротора, який 36 виконаний у вигляді зубчастого колеса з електротехничної сталі.В пази статора уміщуються трі обмоткі – збудження, сінусна і косінусна [36].

Контрольні питання до розділу 4

1. Дати визначення, що таке давач.

2. Як виглядає структурна схема давача і як її інтерпретують у промисловості?

3. Які є принципи організації вихідних перетворювачів давачів?

4. Яка різниця між активним і пасивним сенсором?

5. Чим відрізняється відносний давач від абсолютного?

6. Як виглядає структурна схема керувального комплексу, який показує роль давачів у системі збору даних.

7. Поняття про класифікацію давачів.

8. Яка різниця між контактними і безконтактними давачами?

9. Які Ви знаєте безконтактні давачі – позиційні вимикачі залежно від фізичного явища, покладеного у принцип їх роботи?

10. Як виглядає структурна схема індуктивного давача наближення? Принцип його дії.

11. Що Ви знаєте про структуру виходу безконтактних давачів – позиційних вимикачів?

12. Як виглядає умовне графічне позначення безконтактного давача – позиційного вимикача?

13. Що Ви знаєте про захист напівпровідникових вихідних ключів давачів від перенапруг?

14. Принцип дії ємнісного давача наближення; структурна схема.

15. Які Ви знаєте сфери застосування ємнісних давачів – позиційних вимикачів?

16. Фотоелектричні давачі – позиційні вимикачі. Які їхні переваги? Будова і принцип дії.

17. Поняття про явище фотоефекту та фотогальванічного ефекту, а також про явище поляризації світла.

18. На які типи поділяються фотодавачі залежно від методу виявлення об’єкта?

19. Дайте приклад застосування фотодавачів.

20. Поясніть явище п’єзоелектричного ефекту (пряме та зворотнє).

21. Як виглядає структурна схема ультразвукового давача? Дайте приклади застосування ультразвукових давачів.

22. Що таке передавальна характеристика давача переміщення з аналоговим виходом? Поняття про точність вимірів.

23. Якою є будова магніточутливих безконтактних давачів-герконів?

24. Що таке “ефект Холла”? Опишіть принцип дії сенсора Холла.

25. Нарисуйте структурну схему давача Холла як давача наближення.

26. Що таке котушка, або пояс Роговського? Її призначення і принцип дії.

27. Які Ви знаєте типи чутливих елементів, що їх використовують для побудови сенсорів контактних давачів температури?

28. Що таке номінальна статична характеристика (НСХ) сенсора температури?

29. Які типи термісторів Ви знаєте? Вигляд їх типової НСХ. Сфера застосування.

30. Який принцип дії термопари?

31. Що Ви знаєте про правила під'єднання вимірювального пристрою до термопари?

32. Поняття про теплове випромінювання тіла. Дайте пояснення закону зміщення Віна.

33. Як записується формула Стефана-Больцмана для будь-якого об'єкта?

34. Які Ви знаєте основні параметри безконтактних давачів температури?

35. Дайте визначення енкодера. Які додаткові функції може виконувати енкодер?

36. Яка різниця між інкрементальним та абсолютним енкодером? Дайте порівняльні характеристики.

37. Нарисуйте структурні схеми, які демонструють принцип будови інкрементального та абсолютного енкодера.

38. Що Ви знаєте про способи визначення напрямку обертання осі енкодерів?

39. Чи є можливість збільшити розрізнювальну здатність інкрементального енкодера за існуючої номінативної?

40. Запишіть вираз, який зв'язує розрізнювальну здатність абсолютного енкодера з кількістю виводів.

41. Які Ви знаєте цифрові коди, що застосовуються в абсолютних енкодерах? Дайте їх порівняльні характеристики.

42. В чому сенс понять: однооборотний енкодер, багатооборотний енкодер, лінійний енкодер?

43. Що таке тиск як фізична величина?

44. Які Ви знаєте одиниці вимірювання тиску?

45. Яка різниця між надлишковим тиском, розрідженням та абсолютним тиском?

46. Загальні риси класифікації давачів тиску.

47. Зробіть рисунки, які демонструють принцип будови сильфона, гофрованої діафрагми, мембрани, трубки Бурдона.

48. Який принцип дії тензорезисторного сенсора тиску?

49. Що Ви можете сказати про п’єзорезистивні сенсори тиску?

50. Зобразіть принцип будови ємнісного сенсора тиску. Які його переваги?

51. З якою метою був створений HART-протокол і виготовляються HART-модеми?

52. У чому сенс частотного кодування цифрових сигналів?

53. Які давачі називаємо „інтелектуальними”?

54. Опишіть принцип дії індуктивного сенсора тиску.

55. Короткі відомості про вимірювальний міст Уітстона, заступна схема, принцип дії.

56. Які вимірювальні мости Уітстона називаємо врівноваженими, а які неврівноваженими?

57. Чому кварцовий резонатор називають своєрідним механо-електричним тілом, яка його електрична заступна схема.

58. Нарисуйте спрощений вигляд резонансного кварцового сенсора, принцип дії резонансного давача тиску на його підставі.

59. Принцип будови та дії п’єзоелектричного сенсора тиску.

Список використаної та рекомендованої для користування літератури

1. European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities: «European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the future», European Communities, 2006.

2. «Grids 2030». A National Vision for Electricity's Second 100 years. Office ofElectric Transmission and Distribution of USA Department of Energy, 2003.

3. The National Energy Technology Laboratory: «A vision for the Modern Grid», March 2007.

4. Smart Power Grids — Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

5. Electric Power Research Institute, website: http://epri.com.

6. West Virginia Smart Grid Implementation Plan. — 20 august 2009, website: http:// netl.doe.gov.

7. Gabriel M. A. Visions for a sustainable energy future. — Lilburn, GA: Fairmont Press, 2008. P. 211.

8. Electric Power Research Institute, Electricity Sector Framework for the Future Volume I: Achieving the 21st Century Transformation/Washington, DC: Electric Power Research Institute, 2003.

9. Galvin Electricity Initiative. Fact Sheet: The Electric Power System is Unreliable. 2008, website: http://galvinpower.org.

10. National Renewable Energy Laboratory, Projected Benefits of Federal Energy Efficiency and Renewable Energy Programs — FY 2008 Budget Request, 2007.

11. Jim Detmers. CAISO Operational Needs from Demand Response Resources/California Independent System Operator, November 2006, website: http://caiso.com.

12. Xcel Energy Smart Grid: A White Paper/Minneapolis, MN: Xcel Energy, 2008, website: http://birdcam.xcelenergy.com.

13. Update of the Profiting and Mapping of Intelligent Grid R&D Programs/Electric power research institute, technical report. June 2008.

14. European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities, website: http://europa.eu.int.

15. Ralph Masiello, Hugo van Nispen, Robert Wilhite, Will McNamara. The utility of the future/EnergyBiz. — September-October 2008, website: http://energycentral.com.

16. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Smart Grid за рубежом как концепция инновационно¬го развития электроэнергетики // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 24-30.

17. European Technology Platform SmartGrids. Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the Future. April, 2010.

18. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. – 544 с.

19. Величко О. М., Коцюба А. М., Новіков В. М. Основи метрології та метрологічна діяльність. Навчальний посібник. / — Київ, вид.-во НаУКМА, 2000. — 228 с.

20. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2000. – 360 с.

21. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 522 с.

22. Ємнісні сенсори / Р.І. Байцар, С.С. Варшава, Ю.Ю. Радченко – Львів: Видавництво ЛвЦТТЕІ, 2002 – 63 с.

23. Кучерук В.Ю. Про основні принципи створення вимірювальних пристроїв з використанням генераторів хаотичних коливань/ В. Ю. Кучерук,

В. М. Севастьянов, В. С. Маньковська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. - № 2. – С. 101-104.

24. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: Навчальний посібник. – Харків: Точка, 2012. – 340 с.

25. Клименко Б.В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник. – Харків: Талант, 2008. – 208 с.

26. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.: ил.

27. Электрические и электронные аппараты: Учеб. для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.

28. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.М. Елементна база електронних апаратів: Підручник /. – 2-ге вид. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2007. – 428 с.

29. Бессонов Л. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.

30. Бурштинський М.В., Хай М.В. Апарати захисту та керування в електричних установках низької напруги. – Підручник. –Львів: ТзОВ „Простір М”, 2013. – 732 с.

31. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая 8 с5002.3схемотехника, Москва, „Мир”, 1982.

32. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.

33. Г. Виглеб. Датчики: Пер. с нем. – М.:Мир, 1989.– 196 с., ил.

34. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. – 2004. – октябрь. С.26–35.

35. Афанасьев В. В. и др. Трансформаторы тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.

36. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі / М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Харчишин Б.М. – 2-ге вид. доповн. – Львів: ТзОВ „Простір М”, 2014. – 202 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Касаткіна Ірина Віталіївна
Бойко Сергій Миколайович
Жуков Олексій Анатолійович

ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Навчальний посібник

Підписано до друку _____
Формат __х__/__. Ум. др. арк. __
Тираж 300 прим.

161