

Міністерство освіти і науки України
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій

ОСНОВИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Методичний вказівки
до курсу для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальності 122 «Комп'ютерні науки

Ужгород - 2020

Основи вимірювальної техніки: методичний вказівки до курсу для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

У методичних вказівках до курсу «Основи вимірювальної техніки» докладно розглядається матеріал, який пов'язаний з класифікацією похибок вимірювань, еталонами, вимірювальними перетворювачами, а також методами зменшення похибок вимірювань

Розробники:

Кельман В.А., д.ф.-м.н., професор

Кондрат О.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Голомб Р.М., к.ф.-м.н., доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Рецензенти:

Гуранич П.П., к.ф.-м.н., зав. кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»;

Брила А.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри системного аналізу та теорії оптимізації ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією факультету інформаційних технологій ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (протокол № 2 від 10.01.2020 р.)

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	5
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ІЗ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	10
1.1. Роль і значення вимірювальної техніки	10
1.2. Основні поняття і визначення	10
1.3. Фізичні величини. Основи метрології та стандартизації	11
1.4. Види та методи вимірювань	12
1.5. Класифікація і характеристики засобів вимірювання	14
1.6. Структури засобів вимірювань	15
2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ТА СПОСОБИ ЇХ НОРМУВАННЯ, КЛАСИ ТОЧНОСТІ ЗВ, НОРМОВАНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВ	17
2.1. Класифікація похибок вимірювань	17
2.2. Нормування ЗВ за похибками	18
2.3. Класи точності засобів вимірювань	19
3. ЕТАЛОНИ, МІРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН	22
3.1. Еталони	22
3.2. Міри електричних величин	23
4. ПАСИВНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ II РОДУ	26
4.1. Шунти	26
4.2. Подільники напруги	27
4.3. Вимірювальні трансформатори змінного струму	27
5. АКТИВНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ II РОДУ	29
5.1. Зворотний зв'язок у підсилювачах	29
5.2. Підсилювачі змінного струму	30
5.3. Підсилювачі постійного струму	30
6. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ I РОДУ	34
6.1. Параметричні вимірювальні перетворювачі	34
6.2. Генераторні вимірювальні перетворювачі	38
7. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТА ЦИФРО-АНАЛОГОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	41
7.1. Основні поняття і визначення	41
7.2. Принципи аналого-цифрового перетворення	42
7.3. Цифро-аналогові перетворювачі	45

8. МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ	46
8.1. <i>Метод негативного зворотного зв'язку</i>	46
8.2. <i>Метод допоміжних вимірювань</i>	47
8.3. <i>Ітераційні методи</i>	48
8.4. <i>Методи зразкових мір</i>	49
8.5. <i>Тестові методи</i>	50
9. ЗАВАДИ. МЕТОДИ БОРОТЬБИ ІЗ ЗАВАДАМИ	54
9.1. <i>Види завад, оцінка заводозахищеності</i>	54
9.2. <i>Боротьба із завадами загального виду</i>	55
9.3. <i>Боротьба із завадами нормального виду методом вагового інтегрування</i>	56
9.4. <i>Боротьба із завадами нормального виду методом фільтрації</i>	61
9.4.1. <i>Аналогова фільтрація</i>	62
9.4.2. <i>Цифрова фільтрація</i>	64
ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ НА ІСПИТ	65
ЛІТЕРАТУРА	66

ВСТУП

Вимірювальна техніка - галузь науки і техніки, що вивчає методи і засоби отримання дослідним шляхом інформації про величини, які характеризують властивості і стани об'єктів дослідження та виробничих процесів. Для другої половини ХХ століття характерно поступове усвідомлення того факту, що вимірювальна техніка є не стільки «мистецтвом» вимірювання, скільки особливою науковою дисципліною зі своєю власною системою понять і своїми методами аналізу. Однак процес формування вимірювальної техніки як єдиної наукової дисципліни ще не закінчений. У багатьох промислово розвинених країнах, незважаючи на високий технічний рівень приладобудування, вимірювальна техніка розглядається швидше як галузь промисловості, ніж як галузь науки. В англійській мові, наприклад, немає навіть точного еквівалента терміну Вимірювальна техніка.

Вимірювальна техніка існує з глибокої давнини. За кілька тисячоліть до н. е. розвиток товарообміну привів до вимірювань ваги і появи ваг; примітивна вимірювальна техніка вимагалася також при розділі земельних ділянок (вимірювання площ); при встановленні розпорядку дня і доби, розробленню календаря (вимірювання часу), в астрономічних спостереженнях і кораблеводінні (вимірювання кутів і відстаней); в будівництві (вимірювання розмірів). В античну епоху в процесі наукових досліджень були виконані деякі тонкі вимірювання, наприклад були виміряні кути заломлення світла, визначена дуга земного меридіана. Приблизно до XV століття вимірювальна техніка не відділялася від математики, про що говорять такі назви, як «геометрія» (вимірювання Землі), «тригонометрія» (вимірювання трикутників), «тривимірний простір» тощо. Середньовічні математичні трактати часто містили просте перерахування правил вимірювання площ і об'ємів. Математична ідеалізація реального процесу вимірювання збереглася в ряді важливих математичних понять (від ірраціонального числа до інтеграла).

У XVI-XVIII століттях вдосконалення вимірювальної техніки йшло разом з бурхливим розвитком фізики, яка, ґрунтуючись в той час тільки на експерименті, повністю спиралася на вимірювальну техніку. До цього періоду відносяться удосконалення годинників, винахід мікроскопа, барометра, термометра, перших електровимірювальних приладів та ін. вимірювальних пристроїв, що використовувалися головним чином в наукових дослідженнях. Вже в кінці XVI — на початку XVII століття підвищення точності вимірювань сприяло революційним науковим відкриттям. Так наприклад, точні астрономічні вимірювання Т. Браге дозволили Й. Кеплеру встановити, що планети обертаються по еліптичних орбітах. У створенні вимірювальних приладів та розробці їх теорії брали участь найбільші вчені — Г. Галілей, І. Ньютон, Х. Гюйгенс, — Г. Ріхман та інші. Кожне відкрите фізичне явище втілювалося у відповідному приладі, який, у свою чергу, допомагав точно визначити значення досліджуваної

величини і встановити закони взаємодії між різними величинами. Так, наприклад, поступово було вироблено поняття температури і створена температурна шкала.

Наприкінці XVIII і першій половині XIX століття у зв'язку з поширенням парових двигунів і розвитком машинобудування різко підвищилися вимоги до точності обробки деталей машин, що зумовило швидкий розвиток промислової вимірювальної техніки. У цей час удосконалюються прилади для визначення розмірів, з'являються вимірювальні машини, вводяться калібри тощо. У XIX столітті були створені основи теорії вимірювальної техніки та метрології; набула поширення метрична система мір, що забезпечила єдність вимірювань в науці та виробництві. Величезне значення для В. т. мали праці К. Гаусса, який розробив метод найменших квадратів, теорію випадкових похибок, абсолютну систему одиниць (CGSE) і заклав разом з В. Вебером основи магнітних вимірювань. Завдяки розвитку теплоенергетики, впровадження електричних засобів зв'язку, а потім і перших електроенергетичних установок в промисловості почали використовуватися методи і засоби вимірювання, які до цього застосовувалися лише при наукових дослідженнях, — з'явилися теплотехнічні та електровимірювальні прилади. На рубежі XIX і XX століття в промислово розвинених країнах стали створюватися метрологічні установи. У Росії в 1893 була утворена Головна палата мір і ваги, яку очолив Д. І. Менделєєв.

Початок XX століття знаменує новий етап у розвитку В. т. — електричні, а пізніше і електронні засоби починають застосовуватися для вимірювання механічних, теплових, оптичних величин, для хімічного аналізу, геологічної розвідки тощо, тобто для вимірювання будь-яких величин. З'являються такі нові галузі, як радіовимірювання, спектрометрія тощо. Виникає приладобудівна промисловість. Якісний стрибок у розвитку В. т. стався після другої світової війни 1939–1945 років, коли В. т. виступила як галузь кібернетики, що займається одержанням і перетворенням інформації (вимірювальної), поряд з такими галузями, як автоматика та обчислювальна техніка.

Вимірювання — найважливіший етап діяльності дослідників і експериментаторів у всіх галузях науки і техніки. Вимірювальна апаратура — основне устаткування науково-дослідних інститутів і лабораторій, невід'ємна частина оснащення будь-якого технологічного процесу, головний корисний вантаж метеорологічних ракет, штучних супутників Землі і космічних станцій.

Сучасна вимірювальна апаратура призначається не тільки для сприйняття органами чуття людини, як, наприклад, у випадку сигналізації або відліку результатів вимірювання спостерігачем, але все частіше для автоматичної реєстрації і математичної обробки результатів вимірювання та передачі їх на відстань або для автоматичного керування якими-небудь процесами. У приладах і системах на різних ділянках вимірювальних каналів використовуються механічні, електричні, пневматичні, гідравлічні, оптичні,

акустичні сигнали, амплітудна, частотна і фазова модуляції; надзвичайно широко застосовуються імпульсні і цифрові пристрої, системи спостереження. Процес вимірювання сучасними вимірювальними пристроями полягає в цілеспрямованому перетворенні вимірюваної величини в форму, найзручнішу для конкретного використання (сприйняття) людиною або машиною. Наприклад, сенс дії всіх електровимірювальних приладів (амперметрів, вольтметрів, гальванометрів тощо) полягає в тому, що з їх допомогою вимірювана електрична величина, зміни якої безпосередньо органами чуття людини не можуть бути оцінені кількісно, перетворюється в певне механічне переміщення покажчика (стрілки або світлового променя). Таке ж призначення і багатьох механічних вимірювальних приладів і вимірювальних перетворювачів, за допомогою яких різноманітні фізичні величини перетворюються в механічне переміщення (штангенциркуль, мікрометр, пружинні ваги, ртутний термометр, пружинний манометр або барометр, волосяний гігмометр тощо). Розвиток вимірювальної техніки в кінці першої половини ХХ століття показав, що найзручніше таке перетворення вимірюваних величин, результат якого представляється не як механічні переміщення, а у вигляді електричної величини (струму, напруги, частоти, тривалості імпульсів тощо). Тоді для всіх наступних операцій (передача результатів вимірювання на відстань, їх реєстрація, математична обробка, використання в системах автоматичного управління) може бути застосована стандартна електрична апаратура. Основні переваги використання електричних методів В. т. — простота регулювання чутливості і мала інерційність електричних пристроїв, можливість одночасного вимірювання безлічі різних за своєю природою величин, зручність комплектації з типових блоків електричної апаратури керуючих машин і вимірювально-інформаційних систем. За допомогою електричних вимірювальних пристроїв можна виміряти як повільні, так і дуже швидкоплинні процеси, передавати результати вимірювань на великі відстані або перетворювати їх в сигнали для управління контрольованими процесами, що має найважливіше практичне значення як для промисловості, так і для наукових досліджень.

Сучасна В. т. має ряд напрямків відповідно до області застосування приладів і типами вимірюваних величин:

- лінійні і кутові вимірювання, механічні, оптичні, акустичні, теплофізичні, фізико-хімічні вимірювання, електричні і магнітні вимірювання;
- радіовимірювання;
- вимірювання частоти і часу;
- вимірювання випромінювань і т. ін.

У межах кожної гілки В. т. існує безліч окремих методів вимірювання фізичних величин (які до того ж виявляються неоднаковими при вимірюванні величин різних порядків; так, відстані 10^{-9} м, 10^{-3} м, 10^3 м, 10^9 м вимірюються абсолютно різними методами). Тому окремі гілки В. т. виявляються досить слабо пов'язаними між собою. І, крім того, в межах кожної гілки безперервно

виникають більш дрібні підрозділи по окремих вимірюваних величинах, наприклад тензометрія (вимірювання механічних напружень та деформацій на поверхні деталей, викликаних ними), віброметри (вимірювання віброзміщення, віброшвидкості, віброприскорення, частоти і спектрального складу вібрації), кондуктометрія (вимірювання складу розчинів по їх електричній провідності) і багато інших. Окремо існують галузі В. т., що відрізняються особливим підходом до процесу вимірювання або його метою; наприклад, телеметрія (вимірювання на відстані) — в рамках цієї галузі є ще радіотелеметрія, що включає в себе космічну радіотелеметрію; вимірювання характеристик випадкових процесів — амплітудних розподілів, кореляційних функцій і спектрів потужності; електричні вимірювання неелектричних величин; цифрова В. т., що включає аналого-цифрове перетворення для введення вимірювальної інформації в обчислювальну машину, та ін. Поряд з тенденцією дроблення В. т. на все більш окремі напрямки існує і протилежна тенденція — об'єднання різних галузей В. т. на базі спільності вихідних позицій, принципів побудови та структурних схем апаратури, а останнім часом також і спільності використовуваних засобів вимірювання. Втіленням цієї єдності є Державна система промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП), агрегатна система засобів електровимірювальної техніки. Потреба в засобах В. т. настільки велика і різноманітна, що поряд із загальним приладобудуванням існує авіаційне, аналітичне, геофізичне, медичне приладобудування і т. д.

Тенденції розвитку В. т. до початку 70-х рр. визначилися досить чітко. Основними з них у всіх областях В. т. є:

1. різке підвищення якості приладів — зниження похибок до 0,01% і нижче, збільшення швидкодії до тисяч і навіть мільйонів вимірювань в 1 сек, підвищення надійності приладів і зменшення їх розмірів,
2. розширення області застосування вимірювальної апаратури в напрямку вимірювання величин, що раніше не піддавалися вимірюванню, а також у напрямку посилення умов експлуатації приладів;
3. повсюдний перехід до цифрових методів не тільки в області вимірювань електричних величин, але і у всіх інших областях (вже є цифрові термометри, манометри, газоаналізатори, віброметри і т. д), при цьому аналогові прилади і раніше застосовуються і продовжують вдосконалюватися;
4. подальший розвиток системного підходу до уніфікації вимірювальної апаратури;
5. широке впровадження в усі засоби В. т. методів логічної і математичної обробки вимірювальної інформації.

У галузі метрології слід особливо виділити тенденцію переходу від еталонів, виготовлених людиною, до природних еталонів, заснованих на хвильових і дискретних властивостях матерії. Так, одиниця довжини відтворюється за допомогою довжини світлової хвилі, а одиниця часу — за допомогою періоду коливань природного випромінювача. Подібно до цього, одиниця електричного заряду може бути встановлена через заряд електрона,

одиниця маси — через масу небудь з елементарних частинок і т. д. У приладобудуванні широке промислове застосування знаходять методи вимірювань, які раніше вважалися суто лабораторними і навіть метрологічними, наприклад автоматичні інтерферометри з цифровим відліком для вимірювання малих переміщень. Найважливішою тенденцією в приладобудуванні є мініатюризація і мікромініатюризація засобів вимірювань з використанням новітніх досягнень науки, зокрема фізики твердого тіла. Насущним завданням є формування загальних теоретичних основ В. т. Труднощі розробки полягають в тому, що теорія В. т. межує зі складними питаннями гносеології і математики.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ІЗ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

1.1. Роль і значення вимірювальної техніки

Вимірювальна техніка – один із найважливіших факторів прискорення науково-технічного прогресу практично у всіх галузях народного господарства.

При описанні явищ та процесів, властивостей матеріальних тіл, використовують різні *фізичні величини*, число яких сягає кількох тисяч: електричні, магнітні, просторові й часові, механічні, акустичні, оптичні, хімічні, біологічні та інші. Вказані величини відрізняються не лише якісно, але й кількісно, характеризуючись різними числовими значеннями.

Встановлення числового значення фізичної величини здійснюється шляхом вимірювання. Результатом вимірювання є кількісна характеристика у виді *найменованого числа* із одночасною оцінкою ступеня наближення отриманого значення до істинного значення фізичної величини.

Для реалізації будь-якого процесу вимірювання необхідні технічні засоби. Технічні засоби та методи вимірювань складають основу вимірювальної техніки.

Роль вимірювальної техніки підкреслював великий вчений Д.І.Менделєєв:

– Наука розпочинається з тих пір, як починають вимірювати...

Вимірювальна техніка починає інтенсивно розвиватися з 40-х років XVIII віку й характеризується послідовним переходом від показуючих (середина й друга половина XIX віку), аналогових самопишучих (кінець XIX й початок XX століть), автоматичних й цифрових приладів (середина XX віку) до інформаційно-вимірювальних систем.

Широкі можливості відкрилися перед вимірювальною технікою у зв'язку з появою мікропроцесорів та мікроЕОМ. Важко переоцінити їх значення при створенні автоматизованих засобів вимірювань, роль яких невинно зростає.

1.2. Основні поняття і визначення

Вимірювання – це інформаційний процес отримання дослідним шляхом чисельного співвідношення між даною фізичною величиною та деяким її значенням, прийнятим за одиницю порівняння.

Результат вимірювання – іменоване число, знайдене шляхом вимірювання фізичної величини. Результат вимірювання може бути прийнято за дійсне значення вимірюваної величини. Одна з основних задач вимірювань – оцінка похибки результату вимірювань.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Похибка є безпосередньою характеристикою точності вимірювань.

Точність вимірювання – ступінь близькості результату вимірювання до істинного значення вимірюваної фізичної величини.

Значення похибки вимірювання залежить від досконалості технічних засобів, способів їх використання та умов проведення експерименту.

Принцип вимірювання – фізичне явище чи їх сукупність, покладених в основу вимірювання.

Вимірвальний експеримент – науково обґрунтований дослід для отримання кількісної інформації з можливою точністю. Проведення вимірвального експерименту передбачає наявність технічних пристроїв. Технічні пристрої нормуються за показниками точності і відносяться до засобів вимірювань.

Засіб вимірювання – (ЗВ) – це технічний пристрій, що використовується у вимірвальному експерименті і має нормовані характеристики точності.

Метод вимірювань – це сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювань.

Єдність вимірювань – це такий стан вимірювань, при якому їх результати виражені в указаних одиницях, а похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю. Єдність вимірювань дозволяє порівнювати результати різних експериментів, виконаних у різних умовах у різних місцях з використанням різних методів та засобів вимірювань. Це досягається шляхом точного відтворення та зберігання одиниць фізичних величин та передачі їх розмірів робочим засобам вимірювань.

Метрологія – вчення про міри, наука про методи і засоби забезпечення єдності вимірювань та способах досягнення необхідної точності. Міра призначена для відтворення фізичної величини даного розміру.

1.3. Фізичні величини. Основи метрології та стандартизації

Фізична величина відображає властивість об'єкта, що можна виразити кількісно у прийнятих одиницях. Усяке вимірювання реалізує операції порівняння однорідних властивостей фізичних величин по ознаці “більше-менше”. Внаслідок порівняння кожному розміру вимірюваної величини приписується (співвідноситься) позитивне дійсне число

$$x = q[x],$$

де q – числове значення величини;

$[x]$ – розмірність величини, що називається одиницею величини.

Одиницею величини називається її доля із числовим значенням, рівним одиниці.

Записане рівняння є *основним рівнянням вимірювання*. Чисельне значення q знаходять як $q = x/[x]$, отже воно залежить від прийнятої одиниці вимірювання. Хай маємо дві одиниці вимірювання однієї й тієї ж фізичної величини $[x_1]$ та $[x_2]$. Коефіцієнт зв'язку для двох одиниць вимірювання $K_{1,2} = [x_1]/[x_2]$. Чисельне значення $q_2 = K_{1,2}q_1$.

Основні фізичні величини в Міжнародній системі одиниць СІ:

- одиниця довжини – метр (м);
- одиниця маси – кілограм (кг);
- одиниця часу – секунда (с);
- одиниця сили струму – Ампер (А);
- одиниця термодинамічної температури – Кельвін (К);
- одиниця кількості речовини – моль (моль);
- одиниця сили світла – Кандела (Кд).

Дві додаткові одиниці – радіан (рад) та стерадіан (ср) не є похідними.

Похідні одиниці виражають через основні і отримують із рівнянь зв'язку між величинами, що характеризують даний фізичний закон чи визначення.

Кратні та дільні одиниці утворюють множенням одиниці на 10^n , при цьому n приймає цілі позитивні значення для кратних одиниць або від'ємні для дільних одиниць.

1.4. Види та методи вимірювань

Вимірювальний процес є послідовність вимірювальних перетворень від сприйняття фізичної величини до формування й представлення її числового значення у тій чи іншій формі. Таким чином, для дослідження будь-якого фізичного об'єкта необхідний контакт засобу вимірювання із досліджуванним об'єктом. Для зменшення втрат вимірювальної інформації необхідно правильно визначати метод вимірювання та час усереднення результату вимірювання.

Усі виміри відносяться до 4-х видів (типів): *прямі, непрямі (побічні), сукупні та сумісні*.

При *прямому вимірюванні* шукану величину знаходять безпосередньо із результатів досліду

$$y = x,$$

тобто мета і об'єкт виміру співпадають. Тут y – вихідна величина засобу вимірювання.

При *непрямому вимірюванні* шукану величину знаходять на основі прямого вимірювання ряду параметрів та відомого функціонального зв'язку між ними. Рівняння непрямих вимірювань має вид

$$F(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0.$$

При *сукупному вимірюванні* відбувається одночасне вимірювання однойменних величин. Шукані величини визначаються на основі розв'язку системи рівнянь, число яких \geq числа невідомих величин.

Сумісне вимірювання аналогічне сукупному для неоднорідних величин.

Основні рівняння зв'язку при сукупних і сумісних вимірах мають вид

$$F_1(y_1, \dots, y_n, x_1^{(1)}, \dots, x_m^{(1)}) = 0;$$

$$F_2(y_1, \dots, y_n, x_1^{(2)}, \dots, x_m^{(2)}) = 0;$$

.....

$$F_n(y_1, \dots, y_n, x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) = 0.$$

Тут y_1, \dots, y_n – шукані величини; x_1, \dots, x_m – параметри чи величини, встановлені на основі прямого чи непрямого вимірювання; F_1, \dots, F_n – відомі функції зв'язку.

Процес вимірювання представляє собою той чи інший прийом порівняння вимірюваної величини із величиною відтворюваної міри із використанням різноманітних ЗВ.

Розрізняють також *статичні і динамічні види вимірювань* (вхідна вимірювана величина незмінна чи змінюється у часі).

Сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання утворює *метод вимірювання*. Існують наступні методи вимірювань: безпосередньої оцінки, порівняння з мірою, диференційний, нульовий, заміщення, співпадінь (ноніуса).

При методі *безпосередньої оцінки* результат виміру визначається по пристрою відліку ЗВ.

При методі *порівняння з мірою* вимірювану величину час від часу або в кожному досліді порівнюють із мірою.

При *диференційному методі* на вхід ЗВ подається різницевий сигнал між вимірюваною величиною та мірою.

При *нульовому методі* різницю між вимірюваною величиною і мірою з допомогою спеціального зрівняльного пристрою доводять до нульового значення.

При *методі заміщення* вимірювана величина визначається шляхом заміщення її відомою мірою.

Метод *співпадінь* (або метод “ноніуса”) застосовується у тих випадках, коли вимірювана величина менша ціни поділки заданої міри. При цьому використовуються дві міри з різними цінами поділки, що відрізняються на розмір оцінюваного розряду відліків. Метод ноніуса знаходить широке застосування при вимірюванні часових інтервалів двох близьких частот (биття) і в інших випадках.

Нехай у нашому розпорядженні є калібрована міра із шкалою поділки Δx_{K_1} та вимірювана величина Δx , менша за ціну поділки У цьому випадку використовуємо другу міру з ціною поділки Δx_{K_2} . Якщо чутливість необхідно збільшити в n раз

$$\Delta x_{K_2} = \Delta x_{K_1} (1 - 1/n).$$

Зокрема, для $n=10$, $\Delta x_{K_2} = 0,9\Delta x_{K_1}$

Існує й класифікація методів вимірювань, що спирається на тип вимірювальних перетворень.

При *методі прямого перетворення* вхідний параметр послідовно проходить усі перетворювачі розімкненої ланки. Результат виміру оцінюється по вихідному відліковому пристрою. Рух інформації тут відбувається тільки в одному напрямку, а похибка такого засобу вимірювання повністю визначається похибками усіх перетворювачів ланки перетворень.

При *методі врівноважуючого перетворення* ЗВ містить, як мінімум, два канали перетворення: прямий та зворотній. Вихід каналу прямого перетворення (КПП) подається на вхід пристрою відліку й одночасно на вхід каналу зворотного перетворення (КЗП). На вхід КПП подається різниця між вимірюваною величиною та вихідним сигналом КЗП. Результируюча похибка такого ЗВ практично повністю визначається похибкою КЗП.

1.5. Класифікація і характеристики засобів вимірювання

Існують різні види ЗВ:

Міра – засіб для відтворення фізичної величини в одиницях виміру, або у виді кратних чи дільових одиниць. Міри бувають однозначні, багатозначні.

Вимірювальний перетворювач – ЗВ, призначений для вироблення сигналу вимірів інформації в формі, зручній для передачі, обробки, зберігання, вводу в ЕОМ, але не піддається безпосередньому сприйманню спостерігачем.

Вимірювальний прилад (ВП) – ЗВ, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Допоміжні засоби вимірювання – сукупність допоміжних елементів, призначених для роботи сумісно з ВП. До них належать: шунти, спеціальні високочастотні коаксіальні кабелі і т.п.

Зразкові міри і прилади.

Робочі міри і прилади поділяють на лабораторні та технічні.

Вимірювальні інформаційні системи (ВІС) – ЗВ, призначені для автоматичного представлення інформації у виді зручному для використання у системах керування чи регулювання.

Оцінка ЗВ здійснюється за такими характеристиками:

- точність;

- швидкодія;

- чутливість $S = \frac{dy}{dx}$;

- надійність $P(t) = P(\tau \geq t)$,

- а також діапазон вимірювання, споживання енергії, завадозахищеність, вхідний опір, габарити, маса, вартість.

1.6. Структури засобів вимірювань

Структуру ЗВ у загальному виді наведено на рис.1.1.

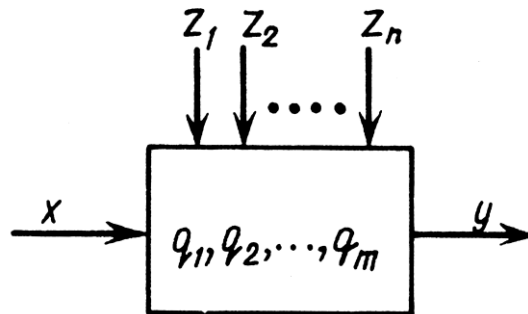


Рисунок 1.1

Тут x – вимірюваний сигнал y – відлік. На ЗВ діють також зовнішні неінформативні параметри z_i (вологість, температура, тиск і т.п.) та ряд внутрішніх параметрів q_j (тип матеріалу, тертя, контактна е.р.с. і т.п.).

Залежно від методу вимірювань за класифікацією: пряме чи врівноважуюче перетворення, – типова структура може бути *розімкненою* або *ж замкненою*.

Розімкнені структури можуть бути послідовного (рис. 1.2,а) й паралельного (рис.1.2,б) типів. (ИП – вимірювальні перетворювачі).

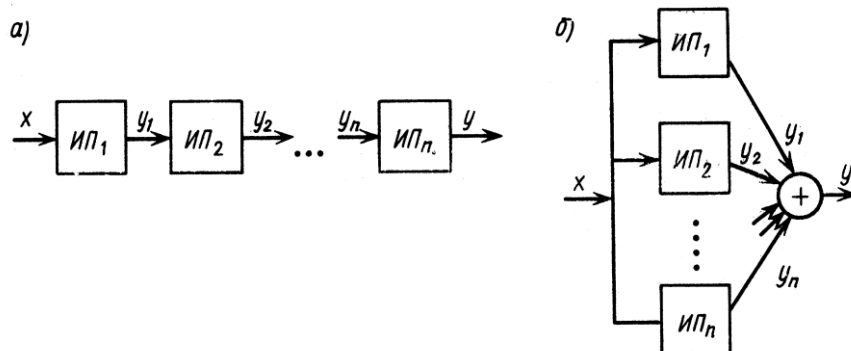


Рисунок 1.2

Структуру замкнутого виду (врівноважуючого перетворення) наведено на рис. 1.3. Тут КПП має коефіцієнт перетворення K ; КЗП має коефіцієнт перетворення β . Відповідно до рисунку

$$y = \Delta x \cdot K, \Delta x = x - x_1, x_1 = y\beta.$$

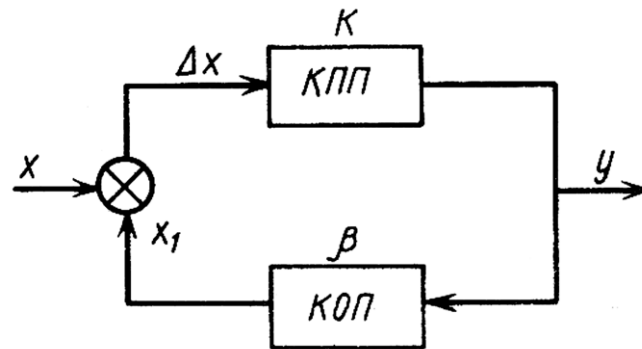


Рисунок 1.3

Для структури розімкненого типу а) (рис.1.2,а) чутливість

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdots S_n = \prod_{i=1}^n S_i;$$

Для розімкненої структури б) (рис.1.2,б)

$$S = S_1 + S_2 + \cdots + S_n = \sum_{i=1}^n S_i;$$

Для замкненої структури (рис.1.3)

$$S = \frac{S_1}{1 + S_1 S_2};$$

Якщо $S_1 \rightarrow \infty$, то $S = 1/S_2$, тобто чутливість ЗВ визначається чутливістю КЗП.

2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ТА СПОСОБИ ЇХ НОРМУВАННЯ, КЛАСИ ТОЧНОСТІ ЗВ, НОРМОВАНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВ

2.1. Класифікація похибок вимірювань

При будь-яких вимірах існує похибка – відхилення результату виміру від істинного значення вимірюваної величини.

Якщо похибка виражена в одиницях вимірюваної величини, то вона називається *абсолютною похибкою* і визначається формулою

$$\Delta = \hat{a} - a,$$

де \hat{a} – значення, отримане при вимірах;

a – істинне значення вимірюваної величини.

На практиці часто використовують *відносну похибку* вимірювань, що рівна відношенню абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини

$$\delta = \Delta / a = \frac{\hat{a} - a}{a}.$$

Відносна похибка зазвичай виражається в процентах.

Так само як й істинне значення вимірюваної величини, похибка вимірювань не може бути визначена абсолютно точно, тому використовують наближені методи її оцінки.

Залежно від *причин* виникнення похибки поділяються на *інструментальні, методичні й суб'єктивні*.

Інструментальна похибка – похибка, що виникає через недосконалість засобів вимірювань. Інструментальні похибки, у свою чергу, поділяють на основну похибку ЗВ та додаткову.

Основна похибка – це похибка в умовах, прийнятих за нормальні.

Додаткова похибка виникає при відмінності значень впливаючих величин від нормальних (температурна похибка, похибка через зміну напруги живлення).

Методична похибка – похибка вимірювань через недосконалість методу вимірювань. Ця похибка може виникати через принципові недоліки використовуваного методу, через неповноту знань про процеси, що проходять при вимірюванні, через неточність використовуваних розрахункових формул.

Якщо допустима інструментальна похибка нормується відповідними документами, то методична похибка має бути оцінена самим експериментатором.

Суб'єктивна похибка зумовлена індивідуальними особливостями особи, що виконує виміри. Це похибки неправильного відрахування десятих долей поділок шкали приладу, асиметричне встановлення штриха оптичного індикатору між двома рисками, запізнення реакції людини на сигнал. Автоматизація ЗВ та вдосконалення конструкцій "відлікових пристроїв"

привели до того, що суб'єктивні похибки як правило, незначні, наприклад, у цифрових приладах вони практично відсутні.

Інша класифікація похибок ґрунтується по такій ознаці, як характер зміни похибки при повторних вимірах – систематичні та випадкові.

Систематична похибка – складова похибки вимірювань, що залишається незмінною чи закономірно змінюється при повторних вимірах (постійні та змінні систематичні похибки). Змінні у свою чергу можуть бути прогресуючими, періодичними чи змінними за складним законом. Закономірний характер систематичної похибки відкриває можливість її зменшення. При цьому слід мати на увазі, що складною задачею може бути вже саме визначення систематичних похибок. Експериментатор не завжди підозрює про існування тієї чи іншої систематичної похибки.

Випадкова помилка – складова похибки вимірювання, що змінюється випадковим чином при повторних вимірах тієї ж самої величини. Випадкова похибка не може бути виключена, але може бути зменшена шляхом статистичної обробки результатів вимірів.

Промах – груба похибка, що суттєво перевершує очікувану. Такий результат вимірювань має бути виключено.

2.2. Нормування ЗВ за похибками

Кожному із засобів вимірювань приписують деякі номінальні характеристики. Дійсні характеристики ЗВ, однак, не співпадають із номінальними, що і визначає їх похибки.

Похибки ЗВ представляють у формі *абсолютних, відносних та приведених похибок*.

Абсолютна похибка міри – різниця між номінальним значенням міри та істинним значенням відтворюваної нею величини.

Для вимірювального перетворювача абсолютна похибка по виходу

$$\Delta_{вих} = y - f_{ном}(x).$$

Абсолютна похибка вимірювального перетворювача, приведена до входу

$$\Delta_{вх} = f^{-1}_{ном}(y) - x.$$

Для того, щоб можна було порівнювати по точності прилади із різними межами вимірювань, вводять поняття *приведеної похибки*, під якою розуміють відношення абсолютної похибки приладу до нормуючого значення

$$\gamma = \Delta / x_{HM},$$

де x_{HM} – нормуюче значення (більша з меж вимірів).

Похибки ЗВ поділяють на *основні* (нормальні умови) та *додаткові*.

Так само, як похибки вимірів, похибки ЗВ поділяються на *систематичні та випадкові*.

При аналізі похибок ЗВ важливим є поділ по їх залежності від значення вимірюваної величини. По цій ознаці похибки діляться на адитивні та мультиплікативні.

Адитивна похибка (абсолютна) – не залежить від значення вимірюваної величини, а *мультиплікативна* – йому пропорційна. Відповідно відносна адитивна похибка обернено пропорційна значенню вимірюваної величини, а відносна мультиплікативна – від нього не залежить. Адитивна похибка називається ще похибкою нуля, а мультиплікативна – похибкою чутливості. Реально похибка ЗВ включає в себе обидві вказані складові.

ЗВ можуть експлуатуватися в статичному чи динамічному режимі роботи.

Найважливіші метрологічні характеристики ЗВ – межа вимірювання, параметри номінальної функції перетворення, ціна поділки шкали, похибка.

2.3. Класи точності засобів вимірювань

З метою обмеження номенклатури ЗВ та впорядкування вимог до них, стандарт встановлює ряди меж допустимих похибок. Цій же меті служить встановлення класів точності ЗВ.

Клас точності – узагальнена характеристика ЗВ, що визначається граничними межами допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими властивостями ЗВ, що впливають на точність.

Ці межі виражають у формі приведених, відносних чи абсолютних похибок залежно від *характеру зміни абсолютних похибок* у межах діапазону вимірювань та умов застосування і призначення ЗВ.

Межі допустимих похибок виражають у формі:

- приведених похибок, якщо вказані межі можна вважати практично незмінними;
- відносних похибок, якщо вказані межі не є постійними;
- абсолютних похибок, якщо похибку прийнято виражати в одиницях вимірювань.

Залежно від характеру зміни у межах діапазону, межі допустимої абсолютної основної похибки встановлюють за формулою

$$\Delta_D = \pm a, \text{ чи}$$

$$\Delta_D = \pm(a + bx).$$

Тут x – значення вимірюваної величини; a і b – позитивні числа, що не залежать від x .

Межі допустимої приведеної основної похибки (в %) встановлюють за формулою

$$\gamma_D = \Delta_D \cdot 100 / x_{HM} = \pm p.$$

Межі допустимої відносної основної похибки (в %) встановлюють за формулою

$$\delta_D = \Delta_D \cdot 100/x = \pm q,$$

якщо Δ_D встановлено відповідно до першого співвідношення для нього, або ж за формулою

$$\delta_D = \frac{\Delta_D}{x} \cdot 100 = \pm [c + d (\frac{x_K}{x} - 1)],$$

якщо Δ_D встановлено відповідно до другого співвідношення для нього. Тут x_K – більша (по модулю) із меж вимірів, а c і d – позитивні числа.

Позитивні числа p, q, c, d у вищенаведених формулах вибирають із ряду

$$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n \quad (n = 1, 0, -1, -2 \dots).$$

Залежно від способу нормування основної похибки використовують різні позначення класів точності.

Якщо нормується приведена чи відносна похибка за першим варіантом, то клас точності визначається одним числом, рівним межі допустимої похибки, вираженої в процентах, тобто p чи q .

Для ЗВ, для яких межі допустимої основної похибки виражені у формі відносних похибок відповідно до другого варіанту, класи точності позначаються числами c, d , розділяючи їх косою лінією.

У випадку нормування абсолютної похибки класи точності позначають великими буквами латинського алфавіту чи римськими цифрами. При цьому меншим похибкам відповідають букви поближче до початку алфавіту або цифри, що означають менші числа.

Межі усіх додаткових похибок та інші властивості ЗВ, що впливають на точність результату виміру, також зв'язані з їх класом точності.

Необхідно нормувати не тільки статичні, але й динамічні характеристики ЗВ. Якщо форма вхідного сигналу може суттєво змінюватися, то необхідно нормувати не динамічну похибку, що залежить від форми вхідного сигналу, а ті чи інші динамічні характеристики: коефіцієнти диференційного рівняння, параметри передаточної функції, частотні характеристики, імпульсну чи перехідну характеристики. Ця задача вирішується відносно просто, якщо ЗВ описується лінійним диференційним рівнянням першого чи другого порядку. Для диференційного рівняння першого порядку може нормуватися параметр – постійна часу, а для диференційного рівняння другого порядку два параметри – власна частота та ступінь прискорення.

Приклади позначення класів точності засобів вимірювань наведено в наступній табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Форма вираження похибки	Межі допустимих основних похибок	Клас точності	
		В документації	На ЗВ
Приведена Δ_d	$\pm 1,5(\%)$	Клас точності 1,5	1,5
	$\pm 0,5(\%)$	Клас точності 0,5	0,5 v
Відносна δ_d	$\pm 0,5(\%)$	Клас точності 0,5	0,5
	$\pm [0,02 + 0,01 (\frac{x_k}{x} - 1)]$ (%)	Клас точності 0,02/0,01	0,02/0,01
Абсолютна Δ_d		М	М
		П	П

Коли ЗВ описується диференційним рівнянням більш високих порядків, звично обмежуються нормуванням тільки окремих показників, таких як смуга пропускання або час встановлення вихідної величини.

Ще складніше нормування динамічних характеристик ЗВ, що описуються нелінійними диференційними рівняннями.

3. ЕТАЛОНИ, МІРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

3.1. Еталони

Еталони – ЗВ, що забезпечують відтворення і збереження одиниць вимірювання з метою передачі їх розміру зразковим і робочим ЗВ. Залежно від точності відтворення одиниць вимірювання еталони розподіляють на три розряди: первинні, вторинні, спеціальні.

Первинний еталон – служить для відтворення одиниці фізичної величини з найвищою у даній країні точністю. Значення вторинних еталонів встановлюється по первинним.

Вторинні еталони створюють для організації випробувальних робіт і забезпечення збереженості первинного еталону.

Спеціальний еталон служить для відтворення одиниці в особливих умовах, при яких первинний еталон не може бути використано.

Первинні і спеціальні еталони затверджуються як *державні* еталони і є вихідними для країни.

Вторинні еталони підрозділяють на еталони-свідки, еталони-копії, еталони порівняння та робочі еталони. Перші три еталони призначені для взаємного порівняння.

Еталон-свідок призначений для випробування державного еталона і заміни його у випадку втрати.

Еталон-копія служить для передачі розміру одиниці робочим еталонам.

Еталон порівняння використовують для порівняння еталонів, що з якихось причин не можуть порівнюватись один з одним. Він використовується також для порівняння національних еталонів різних країн.

Робочий еталон слугує для передачі одиниці вимірювання зразковим засобам вимірювання вищої точності. Робочі еталони зберігаються в інститутах Держстандарту.

В СРСР було понад 130 державних еталонів для усіх основних фізичних величин.

Еталони головних неелектричних фізичних величин створено на основі квантових явищ в атомній фізиці, зокрема еталони довжини та часу.

Метр – довжина, рівна 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає оранжевій лінії спектра криптону 86.

Секунда – інтервал часу, рівний 9192631770 періодам випромінювання квантового переходу атома цезію-133.

Найбільш зручними для зберігання і передачі значень одиниць електричних величин є еталони ома і вольта. У сукупності з еталонами неелектричних величин вони дозволяють відтворити одиниці усіх електричних і магнітних величин.

У 1980 р. Держстандартом СРСР було затверджено первинний *еталон е.р.с.* на основі ефекту Джозефсона (два надпровідники, розділені тонким шаром діелектрика й поміщені в електромагнітне поле частоти ω). На ВАХ переходу з'являються ступені напруги

$$U_n = n\hbar\omega / (2e),$$

де n – номер ступені; \hbar – стала Планка; e – заряд електрона. Номінальне значення е.р.с. еталона складає 1 В. Відтворення одиниці вимірювання характеризуються такими показниками:

$$\theta \leq 5 \cdot 10^{-7}; \quad S \leq 5 \cdot 10^{-8}; \quad \nu = 3 \cdot 10^{-7}.$$

Тут θ – невиключена відносна систематична похибка; S – середньоквадратичне відхилення результату виміру; ν – відносна нестабільність фізичної величини, відтворювана за певний період.

Державним еталоном одиниці опору є комплекс ЗВ, що складається із 10 котушок з обмоткою, виконаною зі спеціального дроту з номінальним значенням електричного опору 1 Ом та мостової вимірювальної установки. Показники точності характеризуються параметрами

$$\theta \leq 5 \cdot 10^{-7}; \quad S \leq 1 \cdot 10^{-7}; \quad \nu = 5 \cdot 10^{-7}.$$

Еталон сили струму виконано відповідно до визначення цієї одиниці. *Ампер* – сила незмінного струму, котрий, протікаючи по двох парних провідниках розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає між цими провідниками силу $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр довжини.

Державний *еталон індуктивності* складається з чотирьох тороїдальних котушок індукції і еталонного індуктивно-ємнісного моста. Показники відтворюваності:

$$\theta \leq 5 \cdot 10^{-5}, \quad S \leq 1 \cdot 10^{-6}; \quad \nu = 1 \cdot 10^{-5} \text{ при } f = 1 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Державний *еталон ємності* складається із розрахункового конденсатора й інтерферометра у єдиному вакуумному блоці та ємнісно-трансформаторного моста. Одиниця ємності відтворюється із точністю

$$\theta \leq 5 \cdot 10^{-7}, \quad S \leq 2 \cdot 10^{-7}, \quad \nu \leq 1 \cdot 10^{-6}.$$

Зразкові засоби вимірювання слугують для передачі одиниць від еталонів до робочих засобів вимірювання.

Не дозволяється застосовувати робочі засоби для проведення повірочних робіт, так само заборонено використовувати зразкові засоби для вимірів, не зв'язаних з повіркою.

3.2. Міри електричних величин

Мірами е.р.с. (напруги) є насичені і ненасичені так звані нормальні елементи (НЕ). Зразковими мірами е.р.с. слугують лише насичені НЕ першого, другого та третього розряду. НЕ – це гальванічні елементи, у яких електролітом є водний розчин сульфату кадмію, додатнім електродом – ртуть і сульфат закису ртуті, а від'ємним – амальгама кадмію. Виводи електродів – із платини. В електроліті насичених НЕ є надлишок сульфату кадмію.

Е.р.с. НЕ становить $\sim 1,018$ В.

Відхилення е.р.с. за 1 рік становить для насичених НЕ не більше $\pm 2 - \pm 50$ мкВ/рік (клас точності 0,0002 – 0,005), а для ненасичених – $\pm 20 - \pm 200$ мкВ/рік (клас точності 0,002 – 0,02).

Для насичених НЕ температурна залежність е.р.с.

$$E_{\theta} = E_{20} - a(\theta - 20^0) - b(\theta - 20^0)^2 + c(\theta - 20^0)^3.$$

Зразковими і робочими *мірами електричного опору* служать вимірювальні котушки та магазини опорів. Матеріал повинен мати високий питомий опір, мінімально залежати від температури, не виробляти е.р.с. у парі з міддю, мати високу стабільність. Цим умовам у найбільш повній мірі задовольняє манганін (84% *Cu*; 12% *Mn*; 4% *Ni*). Його термічний коефіцієнт опору $\leq 1 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ Термо-е.р.с. у контакті з міддю становить ~ 2 мкВ на 1°C . Номінальні значення опорів вимірювальних котушок кратні 10^n Ом ($n = -4, \dots, 0, \dots, 9$).

Температурна залежність опору котушок

$$R_{\theta} = R_{20} \left[1 + \alpha(\theta - 20) + \beta(\theta - 20)^2 \right]$$

По типам розрізняють міри опору негерметизовані, герметизовані, безреактивні.

Повний опір котушки $Z = R[1 + \omega j(L/R - RC)]$.

Тут $\tau = L/R - RC$ – стала часу котушок

Для безреактивної котушки $\tau \sim 10^{-8}$ с

Набір вимірювальних котушок з перемикаючим пристроєм називається магазином опорів. Залежно від конструкції перемикаючі пристрою магазини опорів поділяються на важільні, штепсельні, вилочні, клавішні.

Міри індуктивності також можуть бути однозначними, що виготовляються у вигляді окремих котушок, та багатозначними у вигляді магазинів. Класи точності лежать у межах від 0,01 до 5. Вони використовуються як зразкові робочі міри на частотах $20 - 30 \cdot 10^6$ Гц та номінальних значеннях L і M від $1 \cdot 10^{-9}$ до 10 Гн.

Характеристиками вимірювальних котушок індуктивності також є добротність $Q = \omega L / r$ та постійна часу $\tau = L / r$. Тут ω – частота змінного струму, L – індуктивність котушки, r – активний опір.

Міри електричної ємності виготовляють у виді вимірювальних конденсаторів постійної та змінної електричної ємності й магазинів електричної ємності.

Вимірювальні конденсатори повинні мати високу стабільність ємності, малий температурний коефіцієнт, малу залежність ємності від частоти, високий опір ізоляції та малі втрати енергії в діелектрику. Втрати в діелектриках характеризуються кутом втрат чи тангенсом кута втрат $tg\delta = [1/\omega rC]$. Тут ω – частота змінного струму, C – ємність конденсатора, r – активний опір, включений в еквівалентну схему послідовно з ємністю.

Найкращі зразкові ємності – з повітряним діелектриком. Вони мають великі розміри і практично використовуються для $C \leq 0,001$ мкФ. Для більших ємностей перевагу віддають конденсаторам із слюдяним діелектриком.

Загальна перспектива розвитку зразкових ЗВ – створення цифрокерованих програмованих магазинів опорів, індуктивності і ємності.

4. ПАСИВНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ II РОДУ

Вимірjuвальний перетворювач – ЗВ, призначений для вироблення сигналу вимірjuвальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшої обробки і збереження, але не сприймається безпосередньо спостерігачем. Вимірjuвальний перетворювач, до якого підводиться вимірjuвана величина, називається первинним вимірjuвальним перетворювачем.

Вимірjuвальний перетворювач, призначений для зміни розміру вимірjuваної величини в задане число разів, називається *масштабним вимірjuвальним перетворювачем* або ж *вимірjuвальним перетворювачем II роду*.

Первинні вимірjuвальні перетворювачі, розміщені безпосередньо на об'єкті дослідження і віддалені від місця обробки, відображення і реєстрації вимірjuвальної інформації, називають іноді *датчиками* (датчик кров'яного тиску), або ж *вимірjuвальними перетворювачами I роду*.

Розрізняють два види масштабних перетворювачів:

- *пасивні*, що працюють за рахунок енергії об'єкта дослідження. До них належать шунти, додаткові резистори, вимірjuвальні трансформатори струму й напруги.

- *активні*, що підвищують рівні вхідних сигналів і працюють за рахунок додаткового джерела енергії. До них відносять електронні вимірjuвальні підсилювачі.

4.1. Шунти

Для зменшення сили струму у певне число раз застосовують шунти. Така задача виникає у випадку, коли діапазон показів амперметра менший діапазону зміни вимірjuваного струму. Шунт – це опір, що включається паралельно ЗВ. Якщо опір шунта $R_{Ш} = R_A / (n - 1)$, де R_A – опір ЗВ; $n = I_X / I_A$ – коефіцієнт шунтування, то струм I_A , що протікає через амперметр, в n разів менший вимірjuваного струму I_X .

Шунти виготовляють із манганіну. В амперметрах для вимірjuвання невеликих струмів (до 30 А) шунти поміщають звичайно у корпусі приладів. А для великих струмів (до 7500 А) – використовують зовнішні шунти. Шунти бувають багатозначними, що дозволяє змінювати коефіцієнт шунтування. Класи точності шунтів сягають значень від 0,02 до 0,5.

Шунти в основному використовують у колах постійного струму в магнітоелектричних приладах. Шунти з вимірjuвальними механізмами інших типів не застосовують через малу чутливість цих механізмів, оскільки це призводить до суттєвого збільшення розмірів шунтів та споживаної ними потужності. Крім того, при використанні шунтів на змінному струмі виникає додаткова похибка від зміни частоти.

4.2. Подільники напруги

Для зменшення напруги у певне число раз застосовують подільники напруги, які залежно від роду напруги можуть бути виконані на елементах, що мають чисто активний, ємнісний та індуктивний опір. Серійно випускають подільники напруги, призначені для розширення меж вимірювань вольтметрів постійного струму. Такі подільники виготовляють із резисторів на основі манганіну. Вони мають нормовані коефіцієнти поділу і класи точності від 0,0005 до 0,01.

Для збільшення верхньої межі вимірювання вольтметра, що має внутрішній опір R_V , застосовують додаткові резистори, що включають послідовно із вольтметром. При цьому додатковий опір і вольтметр утворюють подільник напруги.

Величину додаткового опору визначають за формулою

$$R_D = R_V [(U_X / U_V) - 1],$$

де U_X – вимірювана напруга; U_V – падіння напруги на вольтметрі; R_V – внутрішній опір вольтметра; $n = U_X / U_V$ – коефіцієнт поділу напруги. Додаткові резистори роблять із манганінового дроту і використовують для перетворення напруги до 30 кВ постійного та змінного струмів з частотою від 10 Гц до 20 кГц. Класи точності каліброваних додаткових резисторів від 0,01 до 1. Номінальний струм додаткових резисторів складає від 0,5 до 30 мА.

4.3. Вимірювальні трансформатори змінного струму

Вимірювальні трансформатори струму і напруги (рис. 4.1) використовують як перетворювачі великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми і напруги, допустимі для вимірювань приладами з невеликими стандартними межами вимірювань (напруга 100 В, струм до 5 А). Застосуванням вимірювальних трансформаторів у колах високої напруги досягається безпека для персоналу, обслуговуючого прилади, оскільки прилади при цьому включаються у заземлене коло низької напруги.

У трансформаторах струму, як правило, струм первинної обмотки I_1 більший, ніж вторинної I_2 , тому співвідношення витків у них $w_1 < w_2$. У трансформаторах струму з номінальним значенням струму первинної обмотки I_{1H} понад 500 А первинна обмотка може складатися із одного витка у виді шини, що проходить через вікно сердечника.

У трансформаторах напруги первинна напруга U_1 , більша вторинної U_2 , тому в них $w_1 > w_2$. Вторинна номінальна напруга U_{2H} у стандартних трансформаторів складає 100 або $100/\sqrt{3}$ В при різних значеннях первинної номінальної напруги U_{1H} .

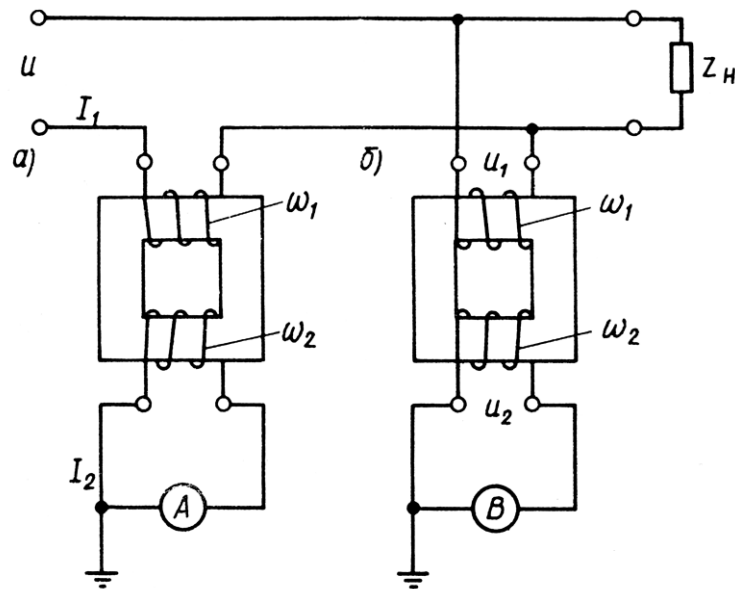


Рисунок 4.1

Коефіцієнти передачі трансформаторів $K_I = I_1 / I_2$ та $K_U = U_1 / U_2$ називають дійсними коефіцієнтами трансформації. У загальному випадку, величини I_2 , U_2 змінюються не пропорційно I_1 , U_1 , тобто K_I та K_U не постійні, а залежать від значень струмів і напруг, характеру і значення напруги, частоти струму і т.п. і, як правило, невідомі. Тому показання приладів множать не на дійсні, а на постійні номінальні коефіцієнти трансформації

$$K_{IH} = I_{1H} / I_{2H} = \frac{w_2}{w_1}, \quad K_{UH} = U_{1H} / U_{2H} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Відносна похибка (в процентах) через нерівність дійсного і номінального коефіцієнтів трансформації для трансформатора струму

$$\delta_I = 100(I_1' - I_1) / I_1 = 100(K_{IH} - K_I) / K_I,$$

де $I_1' = K_{IH} I_2$ і $I_1 = K_I I_2$.

Для трансформатора напруги

$$\delta_U = 100(U_1' - U_1) / U_1 = 100(K_{UH} - K_U) / K_U,$$

де $U_1' = K_{UH} U_2$ і $U_1 = K_U U_2$.

Вжито позначень: δ_I – струмова похибка; δ_U – похибка напруги.

5. АКТИВНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІІ РОДУ

Підсилювач – це пристрій, у якому здійснюється підсилення потужності вхідного сигналу за рахунок енергії допоміжного (додаткового) джерела живлення. Зв'язок між вхідними та вихідними сигналами неперервний і однозначний. У загальному виді підсилювач представляє собою активний чотирьополіусник, на вхід якого подається підсилюваний сигнал, а до виходу приєднується навантаження.

Класифікація підсилювачів може бути здійснена за різноманітними ознаками: по смузі пропускання частот, по типу підсилюваного електричного сигналу, по типу підсилювальних елементів, по схемі включення підсилювальних елементів, по числу каскадів підсилення, по виду міжкаскадних зв'язків і т.п.

Залежно від смуги пропускання розрізняють підсилювачі постійного і змінного струму: у перших нижня гранична частота смуги рівна нулю, у других – відділена від нуля кінцевим інтервалом.

Підсилювач може складатися з одного чи кількох каскадів. Для багатокаскадних підсилювачів загальний коефіцієнт підсилення рівний добутку коефіцієнта підсилення усіх окремих каскадів. Зв'язок між каскадами здійснюється за допомогою пасивних чотирьополіусників міжкаскадного зв'язку.

5.1. Зворотний зв'язок у підсилювачах

У структурі підсилювачів можуть бути ланцюги, що здійснюють передачу частини енергії з виходу на вхід або з виходу наступних каскадів у вхідні кола попередніх каскадів, що називаються колами зворотного зв'язку.

Кількісно зворотній зв'язок оцінюється коефіцієнтом передачі кола зворотного зв'язку β , який показує, яка частина вихідного сигналу поступає на вхід. Залежно від того, який з вихідних параметрів (струм чи напруга) є вхідним для кола зворотного зв'язку, розрізняють зворотний зв'язок по напрузі і по струму. Способи отримання зворотного зв'язку з виходу підсилювача показані на рис. 5.1. Зворотний зв'язок по напрузі формується подільником на резисторах R_1 та R_2 ; зворотний зв'язок по струму знімається з резистора R , включеного послідовно з навантаженням R_H .

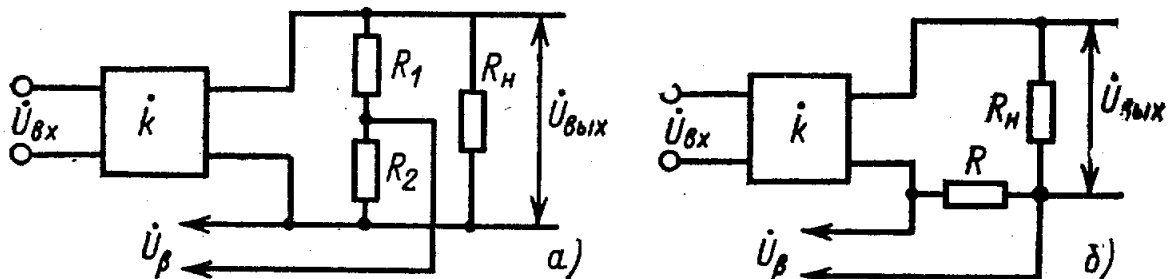


Рисунок 5.1

Залежно від способу включення сигналу зворотного зв'язку у вхідне коло підсилювача розрізняють паралельну та послідовну схеми. У першому випадку у вхідному колі сумуються струми, а у другому – напруги (рис. 5.2).

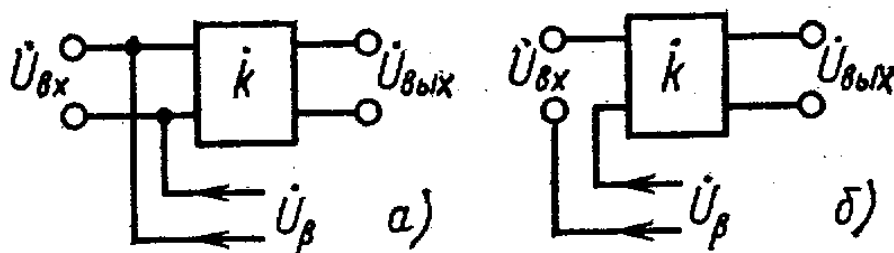


Рисунок 5.2

Залежно від співвідношення фаз напруги, що поступає по колу зворотного зв'язку \dot{U}_β та вхідної напруги $\dot{U}_{вх}$, розрізняють позитивний та негативний зворотний зв'язок. Якщо вихідна напруга зростає – позитивний, якщо зменшується – негативний.

Частіше використовується негативний зворотний зв'язок, що дозволяє підвищити точність вимірювальних підсилювачів.

5.2. Підсилювачі змінного струму

Серед підсилювачів змінного струму розрізняють

- підсилювачі низької частоти (ПНЧ), призначені для підсилення сигналів з частотою від десятків Гц до 15 – 20 кГц;
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ) із верхньою граничною частотою в десятки й сотні МГц;
- широкосмугові підсилювачі, що підсилюють сигнал у широкій смузі частот (десятки Гц – кілька МГц);
- імпульсні підсилювачі – широкосмугові підсилювачі, смуга пропускання яких вибирається так, щоб спотворення форми сигналу було мінімальне. Форма імпульсу визначає його спектр. Чим крутіший фронт імпульсу – тим ширший спектр в області верхніх частот; чим довші пологі ділянки – тим більше низькочастотних складових.

5.3. Підсилювачі постійного струму

Підсилювачами постійного струму (ППС) прийнято вважати підсилювачі, що здатні підсилювати повільно змінні у часі сигнали. Нижня робоча частота таких підсилювачів $\omega_H = 0$, а вища ω_B визначається призначенням підсилювача. ППС застосовують для підсилення як повільно змінних сигналів, так і слабких сигналів змінного струму, наприклад для підсилення сигналів з датчиків (термопар, фото-датчиків, тепло-датчиків), в осцилографах, стабілізаторах струму і напруги і т. д. Для сполучення каскадів використовується безпосередній зв'язок. Відсутність у

міжкаскадних зв'язках реактивних елементів дозволяє передавати постійну і змінну складові сигналу.

Для ППС є властивим *дрейф нуля*. Під дрейфом нуля розуміють мимовільну зміну вихідної напруги при постійному чи нульовому сигналі на вході. Дрейф нуля оцінюють зміною за одиницю часу вхідної напруги $U_{вх.др}$, що викликає еквівалентну зміну вихідної напруги

$$U_{вх.др} = U_{вих.др} / K_U,$$

де K_U – коефіцієнт підсилення по напрузі.

Причинами дрейфу можуть бути: зміна напруги живлення, температури, поступова зміна параметрів активних і пасивних елементів схем. Головними мірами зменшення дрейфу є попередній прогрів підсилювача, стабілізація напруг джерел живлення, використання компенсаційних схем, елементів із нелінійною залежністю параметрів від температури, перетворення постійного струму у змінний і підсилення змінного струму з наступним перетворенням. В транзисторних підсилювачах дрейф зумовлений термочутливістю транзисторів.

Коли допустимий дрейф нуля складає одиниці мікрвольт, використовується підсилювач з перетворювачем напруги. Ці підсилювачі будують по схемі модулятор – підсилювач – демодулятор (рис. 5.3). В модуляторі M повільно змінний вхідний сигнал перетворюється в амплідно-модульовану змінну напругу, яку підсилює підсилювач змінної напруги $У$. Підсилена змінна напруга поступає на вхід демодулятора $ДМ$, що керується тим самим джерелом опорної напруги $ИОН$, що й модулятор. Дрейф нуля такого підсилювача значно менший, аніж у звичайних ППС, оскільки він зумовлений лише дрейфом нуля модуляторів та демодуляторів.

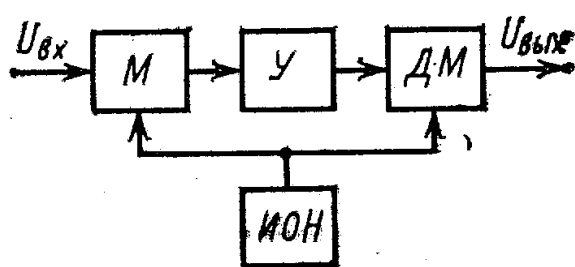


Рисунок 5.3

Промисловістю випускаються в інтегральному виконанні *операційні підсилювачі* (ОП). Операційними прийнято називати ППС з диференціальним входом і однотактним виходом, що відрізняються високим коефіцієнтом підсилення, а також великим вхідним та малим вихідним опором (рис. 5.4). Термін “операційний підсилювач” виник у аналоговій обчислювальній техніці, де подібні підсилювачі з відповідними зворотними зв'язками

застосовувалися для моделювання різних математичних операцій (інтегрування, сумування і т. д.).

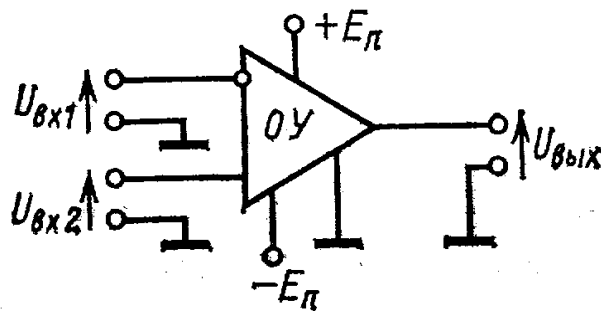


Рисунок 5.4

Залежно від полярності сигналів на вході і виході один із входів називається інвертуючим, а другий – неінвертуючим. Інвертуючий вхід позначається кружечком.

До основних параметрів ОП відносять коефіцієнт підсилення K , температурний коефіцієнт напруги зміщення нуля ε , середній вхідний струм $I_{вх.с}$ і різницю вхідних струмів $\Delta I_{вх}$, напругу живлення $E_{жс}$, споживаний струм $I_{сп}$ та потужність $P_{сп}$. Для сучасних ОП $K = 10^5 \div 10^6$; $\varepsilon = 2 \div 3$ мкВ/°С; $I_{вх.с} = 5 \div 10$ нА; $\Delta I_{вх} = 1 \div 10$ нА.

Принципова схема ОП містить, як правило, один, два чи три каскади підсилювачів напруги, причому вхідний каскад завжди виконується по диференціальній, паралельно-симетричній схемі.

Для підвищення точності вимірювальних підсилювачів широке застосування знаходить негативний зворотний зв'язок.

Еквівалентна схема ОП наведена на рис. 5.5.

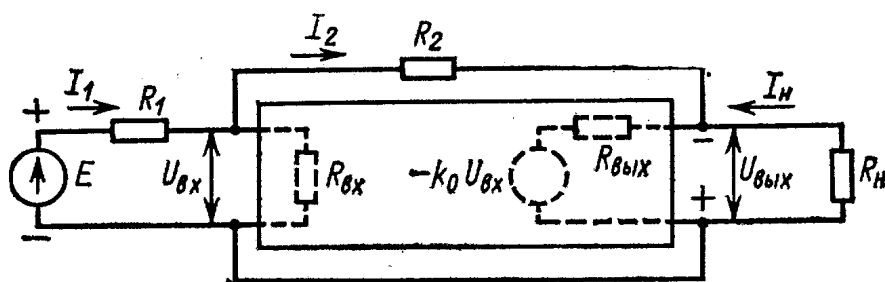


Рисунок 5.5

Якщо прийняти $R_{вх} = \infty$, а $R_{вих} = 0$, то $I_{вх} = 0$ і $U_{вих} = -K_0 U_{вх}$, а струми I_1 та I_2 виявляться однаковими, тобто $(E - U_{вх}) / R_1 = (U_{вх} - U_{вих}) / R_2$.

Виконавши відповідні перетворення, отримаємо коефіцієнт підсилення схеми

$$K = \frac{U_{вих}}{E} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / K_0}.$$

Якщо виконується нерівність $K_0 \gg \frac{R_2}{R_1} + 1$, то $K = -R_2 / R_1$.

Видно, що за певних умов коефіцієнт підсилення схеми залежить тільки від параметрів кола зворотного зв'язку і не залежить від параметрів самого підсилювача.

6. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ І РОДУ

6.1. Параметричні вимірвальні перетворювачі

Вимірвальні перетворювачі І роду розділяються на два класи – параметричні та генераторні.

У параметричних перетворювачах вихідною величиною є параметр (або прирощення параметру) електричного кола (R, L, M, C). При використанні параметричних перетворювачів необхідним є додаткове джерело живлення, енергія якого використовується для утворення вихідного сигналу перетворювача.

При створенні вимірвальних перетворювачів неелектричних величин намагаються отримати лінійну функцію перетворення. Відхилення реальної градуовальної характеристики від номінальної лінійної функції перетворення якраз й зумовлює похибку нелінійності, що є головною складовою результуючої похибки при вимірюванні неелектричних величин.

Одним із способів зменшення похибки нелінійності є вибір таких вхідної та вихідної величин перетворювача, зв'язок між якими якомога ближчий до лінійної функції.

Другим ефективним способом зменшення похибки нелінійності параметричних вимірвальних перетворювачів є побудова їх за диференційною схемою. Будь-який диференційний вимірвальний перетворювач фактично являє собою два ідентичні вимірвальні перетворювачі, вихідні величини яких віднімаються, а вхідна величина діє на ці перетворювачі протилежним чином. Структурну схему диференційного вимірвального перетворювача наведено на рис. 6.1.

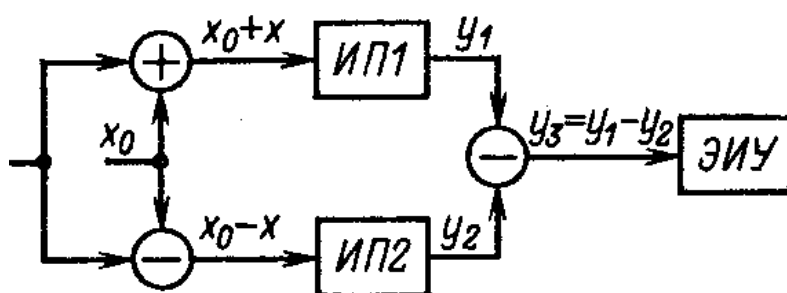


Рисунок 6.1

Вимірювана величина x діє на два ідентичні вимірвальні перетворювачі $ИП1$ та $ИП2$. Відповідні прирощення значень вихідних величин y_1 та y_2 мають протилежні знаки. Окрім того, на входах є деяке постійне початкове значення x_0 вхідної величини. Вихідні величини y_1 та y_2 віднімаються, а їх різниця y_3 вимірюється електровимірвальним пристроєм $ЗИУ$ (аналоговим, або ж цифровим).

Допустимо, що передаточні функції обох ідентичних перетворювачів достатньо точно описуються алгебраїчним поліномом другого порядку. У цьому випадку

$$y_1 = a_0 + a_1(x_0 + x) + a_2(x_0 + x)^2,$$

$$y_2 = a_0 + a_1(x_0 - x) + a_2(x_0 - x)^2.$$

Після віднімання отримаємо

$$y_3 = y_1 - y_2 = 2(a_1 + 2a_2x_0)x.$$

Видно, що результуюча функція перетворення $y_3 = f(x)$ виявилася лінійною. Оскільки y_3 не залежить від a_0 , то відбувається компенсація систематичних адитивних похибок вимірювальних перетворювачів. Окрім того, у порівнянні із одним вимірювальним перетворювачем удвічі зростає чутливість. Через усі ці фактори диференційні вимірювальні перетворювачі широко використовуються в практиці.

Коротко розглянемо основні типи параметричних вимірювальних перетворювачів неелектричних величин.

Параметричні перетворювачі, вихідною величиною яких є електричний опір, називаються *резистивними (реостатними)*. Реостатні перетворювачі засновані на зміні електричного опору провідника під впливом вхідної величини, наприклад, – переміщення. У випадку, коли вхідною величиною є переміщення, використовують реостатні перетворювачі, в яких повзунок реостата переміщується відповідно до вимірюваної величини. На рис. 6.2 зображено конструкції реостатних перетворювачів кутових (рис. 6.2,а) та лінійних (рис. 6.2,б) переміщень.

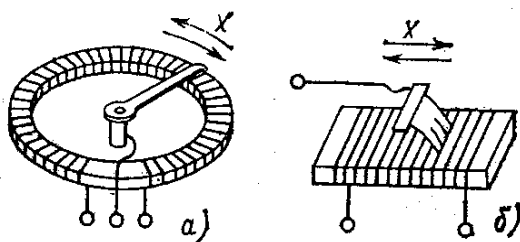


Рисунок 6.2

Перетворювач складається з обмотки, намотаної на каркас, та рухливої щітки (контакту). Форма каркасу залежить від характеру переміщення (лінійне, кутове), та виду необхідної функції перетворення (лінійна, нелінійна). Використовуються каркаси в формі пластини, циліндра, кільця й т.п. Намотка виконується із сплавів платини підвищеної антикорозійної здатності. Використовують також манганін, константан, фехраль.

Реостатні перетворювачі з дротяною намоткою є ступінчатими (дискретними). Через це їм властива похибка дискретизації. Вона відсутня в реохордних перетворювачах, у котрих щітка ковзає вздовж каліброваного дроту.

Індуктивні перетворювачі. Принцип дії індуктивних перетворювачів засновано на залежності індуктивності чи взаємної індуктивності обмоток на магнітопроводі від положення, геометричних розмірів і магнітного стану елементів їх магнітного кола.

Індуктивність та взаємну індуктивність можна змінювати змінюючи довжину або ж площу поперечного перерізу повітряного проміжку магнітного кола, магнітну проникність та втрати у магнітопроводі. Деякі типи індуктивних перетворювачів схематично зображено на рис. 6.3.

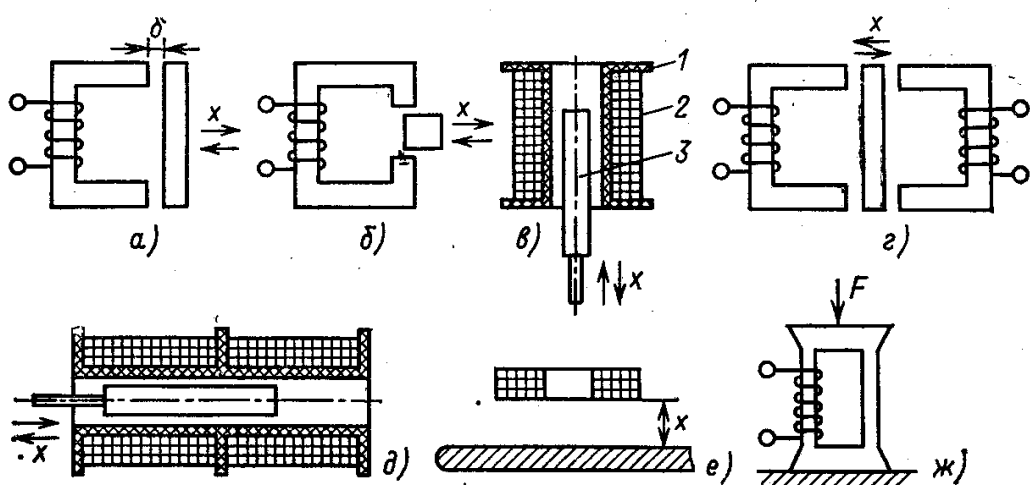


Рисунок 6.3

Індуктивний перетворювач (рис. 6.3,а) із змінною довжиною повітряного проміжку δ характеризується нелінійною залежністю $L = f(\delta)$. Діапазон робочих переміщень у подібних перетворювачах складає 0,01 – 10 мм.

Перетворювач із змінною площею повітряного проміжку (рис. 6.3,б) дозволяють вимірювати переміщення до 15 – 20 мм.

Перетворювач із розімкненим магнітним колом (рис. 6.3,в) представляє собою обмотку, намотану на пластиковий каркас, всередині якого переміщується сердечник із феромагнітного матеріалу. Переміщення сердечника веде до зміни індуктивності котушки. Цей тип перетворювача може бути застосовано для вимірювання переміщень до 100 мм.

Широко розповсюджені на практиці диференціальні перетворювачі (рис. 6.3,г та д), у яких переміщення рухомого елемента викликає збільшення індуктивності однієї обмотки й зменшення індуктивності другої.

Рис. 6.3,е ілюструє принцип дії струмовихрового перетворювача, у якому зміна індуктивності котушки відбувається через зміну відстані від неї

до провідного тіла. Такі перетворювачі використовуються для безконтактного контролю лінійних розмірів та товщини покриттів та визначення поверхневих дефектів (тріщини, подряпини і т.п.).

Принцип дії магнітопружних перетворювачів (рис. 6.3,ж) засновано на зміні магнітної проникності μ ферромагнітних тіл залежно від механічної напруги, зумовленої дією зовнішніх сил. Зміна $\Delta\mu/\mu$ для різних матеріалів складає 0,5 – 3 % при зміні механічної напруги в матеріалі на 1 МПа.

Індуктивні перетворювачі мають високу чутливість й значну потужність вихідного сигналу. Ці фактори й визначають значну сферу їх використання.

Взаємоіндуктивні перетворювачі називають ще *трансформаторними*.

Ємнісні перетворювачі засновано на залежності електричної ємності конденсатора від розмірів, взаємного розташування його обкладок і діелектричної проникності середовища між ними. Електрична ємність плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S / \delta,$$

де ε_0 – діелектрична стала; ε – відносна діелектрична проникність середовища поміж обкладинками; S – активна площа обкладок; δ – відстань між обкладинками. Отже, у ємнісному перетворювачі вхідною змінною величиною можуть бути ε , S та δ . На рис. 6.4 схематично зображено кілька типів ємнісних перетворювачів.

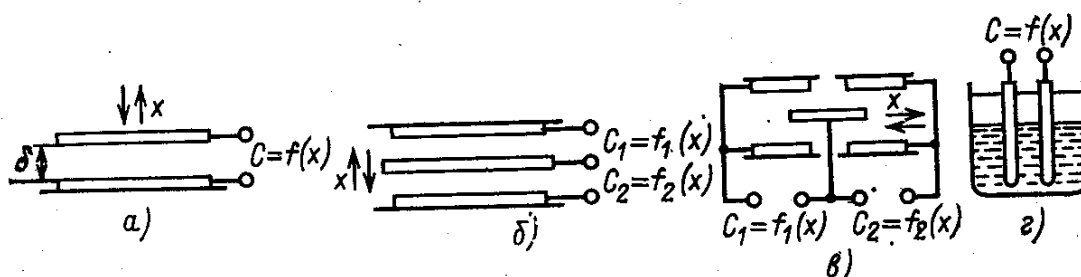


Рисунок 6.4

У перетворювачі на рис. 6.4,а одна пластина вимірювального конденсатора переміщується відносно другої. Таким чином, змінюється відстань між пластинами δ . Функція перетворення $C = f(\delta)$ нелінійна. Чутливість перетворювача зростає із зменшенням δ . Використовуються такі перетворювачі для вимірювань малих переміщень (~ 1 мм).

На рис. 6.4,б наведено диференційний ємнісний перетворювач. При переміщенні центральної пластини ємність одного конденсатора збільшується, а другого зменшується.

Перетворювач на рис. 6.4,в також диференційної конструкції. У ньому змінюється активна площа пластин. У такому конденсаторі необхідну функцію перетворення отримують профілюванням пластин.

На рис. 6.4,г зображено ємнісний перетворювач для визначення рівня рідини. Ємність між електродами залежить від рівня рідини, оскільки діелектрична проникність контрольованої рідини відрізняється від діелектричної проникності повітря.

Ємнісні перетворювачі відносно прості за конструкцією, мають високу чутливість, малу інерційність. Недоліки – недостатня захищеність щодо впливу зовнішніх електричних полів, паразитних ємностей, температури, вологості.

6.2. Генераторні вимірювальні перетворювачі

В генераторних перетворювачах вихідною величиною є е.р.с., струм чи заряд, функціонально зв'язані із вимірюваною неелектричною величиною.

П'єзоелектричні перетворювачі засновано на використанні прямого п'єзоелектричного ефекту. Він полягає у появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів (кварц, сегнетова сіль та інші) під впливом механічної напруги. Їх вихідна потужність надзвичайно мала, тому до виходу перетворювача слід підключати підсилювач із якомога більшим вхідним опором (10^{11} Ом й більше).

На рис. 6.5 схематично зображено п'єзоелектричний перетворювач тиску. Тиск P , що належить виміряти, діє на мембрану 1. Кварцові пластини 1 та 2 складено паралельно. Зовнішні обкладинки (поверхні) кварцових пластин заземлено, а середні обкладинки (латунна фольга 3) ізольована відносно корпусу самим кварцом. Сигнал з пластин знімається екранованим кабелем 5. Технологічний отвір закрито пробкою 4.

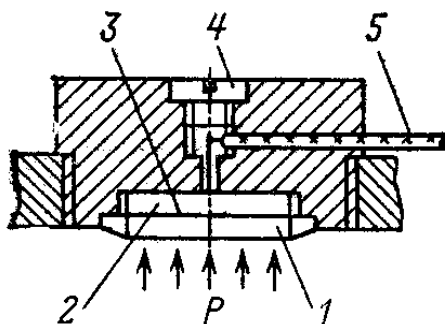


Рисунок 6.5

Електричний заряд Q , що виникає на кварцових пластинах, пропорційний тиску, тобто

$$Q = kF = kPS,$$

де k – п'єзоелектричний коефіцієнт, F – сила, що діє на перетворювач, S – площа мембрани.

Детальний аналіз частотних характеристик показує, що п'єзоелектричні перетворювачі успішно можуть бути використані тільки для

вимірювань швидкозмінних величин (змінних зусиль, тисків, параметрів вібрацій, прискорень і т.п.).

Індукційні перетворювачі (не путати з індуктивними) засновані на використанні закону електромагнітної індукції

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

де Φ – магнітний потік, зчеплений з котушкою, що має w витків.

Індукційні перетворювачі застосовують для вимірювань швидкості лінійних та кутових переміщень (тахометри), параметрів вібрацій та прискорень (акселерометри).

На рис. 6.6 схематично зображено індукційний перетворювач лінійних переміщень. Він являє собою циліндричну котушку 1, що переміщується в кільцевому зазорі магнітопроводу 2. Циліндричний постійний магніт 3 створює в кільцевому зазорі постійне радіальне магнітне поле. При переміщенні в котушці індукується е.р.с., пропорційна швидкості переміщення.

Індукційні перетворювачі конструктивно прості й надійні в роботі, проте мають обмежений частотний діапазон вимірюваних величин.

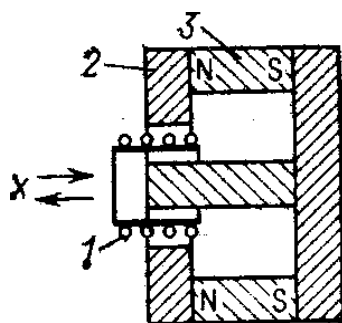


Рисунок 6.6

Термоелектричні перетворювачі (термопари) засновано на термоелектричному ефекті, що виникає у колі термопари. Цей ефект полягає у тому, що у замкненому контурі, який складається із двох різнорідних провідників (напівпровідників), тече струм, якщо місця спаїв провідників мають різні температури.

Якщо взяти замкнений контур (рис. 6.7,а), що складається із різнорідних провідників A та B , то на їхніх спаях 1 і 2 виникнуть термо-е.р.с., що залежать від температур t та t_0 цих спаїв. Оскільки вони включені зустрічно, то результуюча термо-е.р.с.

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0).$$

Електровимірювальний прилад (мілівольтметр) підключається в контур термопари двома способами: у вільний кінець термопари (рис. 6.7,б) та в один із термоелектродів (рис. 6.7,в). Найбільшого поширення набув

перший спосіб. Проте незалежно від способу підключення результат вимірювання відповідатиме вже зазначеному співвідношенню.

Термопари дозволяють вимірювати температуру в діапазоні від -200 до $+2200$ °С. Для вимірювань температури до 1100 °С використовують в основному термопари із неблагородних металів, в інтервалі $1100 - 1600$ °С – термопари із благородних металів, а ще більш високих температур – термопари із жаростійких сплавів на основі вольфраму.

При вимірюваннях температури в широкому інтервалі температур слід враховувати нелінійність функції перетворення термоелектричних перетворювачів.

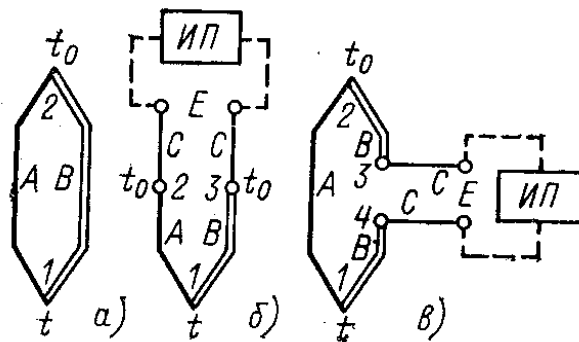


Рисунок 6.7

Пірометри називаються прилади для вимірювання температури, робота яких заснована на використанні законів випромінювання нагрітих тіл. Окрім того, перевага використання пірометрів полягає у безконтактності методу вимірювань.

7. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТА ЦИФРО-АНАЛОГОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

7.1. Основні поняття і визначення

Цифрові вимірювальні перетворювачі (ЦВП) мають ряд переваг перед аналоговими електровимірювальними приладами. На відміну від аналогових приладів в ЦВП обов'язково виконуються операції:

- квантування вимірювальної величини за рівнем;
- дискретизація її у часі;
- кодування інформації.

Цифровими називаються вимірювальні прилади, що автоматично виробляють дискретні сигнали вимірювальної інформації і представляють показники у цифровій формі. Значення вихідної величини, що відображається на цифровому відліковому пристрої, відповідає коду, отриманому у ЦВП.

Будучи частиною цифрових приладів, вимірювальні перетворювачі видають результат у вигляді коду. Кодування може проводитися з допомогою різних систем числення. У цифровій вимірювальній техніці прийняті переважно двійкова система та її різновиди. Двійкове зображення числа вимагає більшого числа розрядів, ніж десяткове (~ в 3 рази), проте це зручно для технічної реалізації, оскільки пристрій повинен мати лише два стійких стани (тригер).

Залежно від черговості виводу у часі символів кодового сигналу розрізняють *паралельні і послідовні коди*. При паралельному коді інформація про стан усіх розрядів передається одночасно, тобто для цього потрібно стільки ліній, скільки розрядів у кодовій комбінації.

Послідовний вивід може бути здійснено лише у вигляді послідовності імпульсів напруги, при цьому важлива не тільки наявність імпульсу у послідовності чи його відсутність, але й місцеположення символу у часі.

На рис. 7.1 наведено структурну схему цифрового вимірювального приладу. За відсутності необхідності візуального контролю результатів вимірювань, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) застосовують як самостійний пристрій, який забезпечує на виході результат вимірювань у коді, зручному для реєстрації та вводу в ЕОМ.

Призначення вузлів АЦП наступне. У вхідному перетворювачі *Пр1* аналогова величина перетворюється із одного виду в інший, наприклад здійснюється масштабування вхідного сигналу, перетворення напруги в інтервал часу, або змінної напруги, опору, ємності в постійну напругу. Тут також може здійснюватися попередня дискретизація в часі. Перетворення аналог-код здійснюється у перетворювачі *Пр2*. Якщо отриманий код є незручним, то у перетворювачі *Пр3* здійснюють перехід до нового коду, який є вихідним кодом для АЦП. Із нього кодовий сигнал поступає на пристрій індикації *УИ*. Узгоджену роботу АЦП забезпечують сигнали пристроїв керування АЦП *УУ* та усього приладу *УПП*.

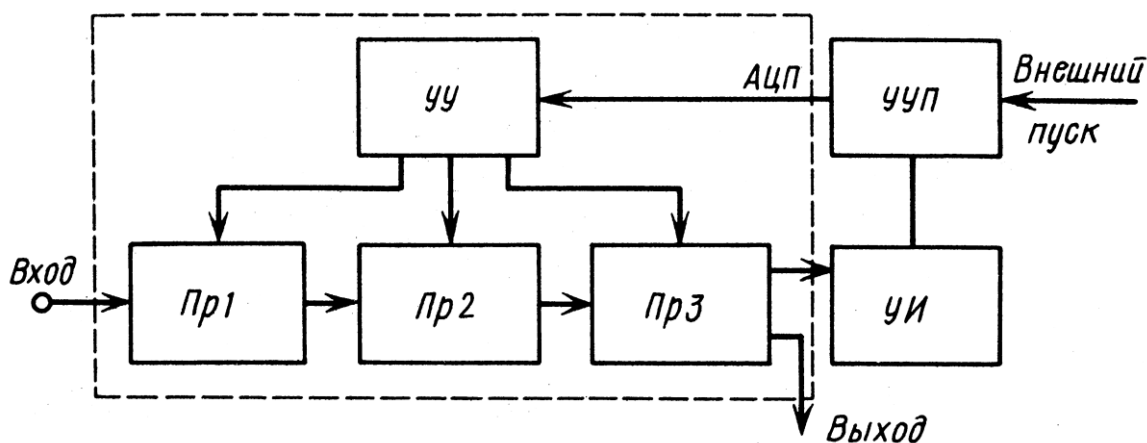


Рисунок 7.1

По роду вимірюваних величин ЦВП підрозділяються на вольтметри, частотометри, фазометри, омметри і т. д. Крім того їх поділяють на групи за точністю, швидкістю, надійністю.

Залежно від способу організації процесу перетворення усі ЦВП поділяються на прилади циклічні і слідкуючі. У циклічних приладах весь процес перетворень протікає завжди незалежно від значення вимірюваної величини по заданій програмі від початку до кінця. Знімання показів допускаються лише під час частини повного такту вимірювання – часу індикації. У слідкуючих ЦВП перехід до чергового перетворення здійснюється при зміні вхідного сигналу на певне прирощення.

Прилади слідкуючої дії можна віднести до пристроїв адаптивної дискретизації, оскільки частоту перетворювань вибирають, виходячи із характеру сигналу.

7.2. Принципи аналого-цифрового перетворення

Перетворення аналогової величини у цифровий код є вимірювальною процедурою і здійснюється шляхом виконання ряду операцій порівняння вимірюваної величини з набором дискретних еталонних величин, що мають однакову природу із перетворюваною. При цьому відбувається заміна неперервної величини на найближчу, фіксовану, утворену по певному алгоритму з допомогою міри, і зчитування коду, що відповідає цьому фіксованому значенню.

Одним з критеріїв, що лежать в основі класифікації методів аналого-цифрового (АЦ) – перетворення є характер АЦ – перетворювання у часі. У відповідності із цим критерієм розрізняють методи послідовного підрахунку, метод порозрядного врівноваження, метод одночасового зчитування.

Метод послідовного підрахунку. Суть полягає у послідовному у часі порівнянні вимірюваної величини з відомою однорідною дискретною мірою x_0 .

Нехай вимірювана величина $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$. На рис. 7.2,а зображено перший варіант методу послідовного підрахунку. При деякому

числі n квантів x_0 має місце строга рівність $nx_0 = x_*$ або ж із деякою похибкою ξ

$$nx_0 + \xi = x_*,$$

де x_* – значення вимірюваної величини.

Якщо вибрати x_0 рівним одиниці вимірювання x , то число n буде одиничним кодом вимірювальної величини. Похибка квантування $0 \leq \xi \leq x_0$.

Час АЦ – перетворення обернено пропорційний точності. Достоїнства: порівняна простота, мала статистична похибка, недолік – мала швидкодія. Області застосування – цифрові вольтметри постійного струму.

Метод порозрядного врівноваження (порівняння). Можна значно прискорити вимірювання, якщо користуватися набором різновеликих квантів x_{0i} (кодоімпульсний метод). Процес порівняння x_* та x_k (рис. 7.2,б), як і в попередньому методі, проходить послідовно у часі. Тут підключаються чи відключаються від процесу порівняння кванти x_{0i} , що по ефективності рівносильні деякому набору із k елементарних квантів x_0 . Це дозволяє кваліфікувати метод порозрядного врівноваження як паралельно-послідовний.

Метод дозволяє отримати суттєвий вигравш у швидкодії (до $10^5 - 10^6$ перетворень в секунду).

Метод одночасного зчитування (порівняння). При цьому методі реалізується взаємооднозначна відповідність між множиною $\{x_{0i}\}$ квантів порівняння і очікуваною множиною дискретних значень вхідної неперервної величини x_*^i . Вихідний код утворюється за номером найближчого значення x_{0i} . Таким чином “одночасовість” методу означає паралельність включення усіх квантів x_{0i} у процесі порівняння. Отже цей метод повністю паралельний. Це найбільш швидкодіючий метод (100 – 200 МГц).

Гібридні методи – на основі сполучення методів зчитування і порозрядного врівноваження.

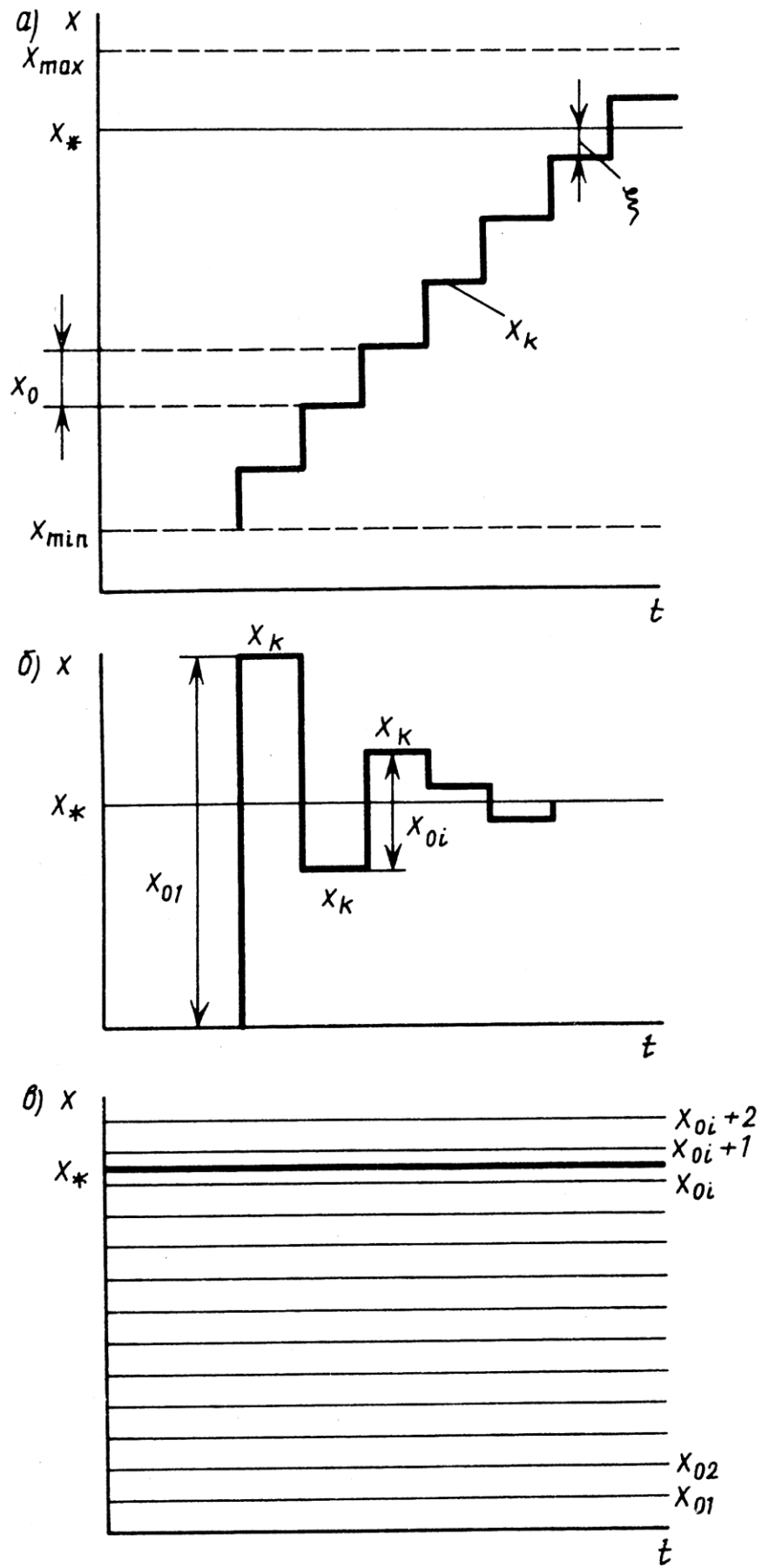


Рисунок 7.2

7.3. Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) здійснюють перетворення цифрових кодів в аналоговий сигнал. Стандартним засобом для перетворення інформації з коду в аналог є сітка із прецизійних опорів, що комутується електронними ключами, які управляються цифровим кодом.

ЦАП можна розглядати як потенціометр із цифровим керуванням, який задає струм чи напругу як частину повної шкали. Базова схема ЦАП складається із джерела опорної напруги, матриці двійково-вагових прецизійних резисторів та набору електронних ключів – комутаторів.

При замиканні кожного ключа струм у вихідній сумуючій шині отримує двійково-вагове прирощення. Встановивши на виході операційний підсилювач (ОУ), що перетворює струм в напругу, можна ЦАП із виходом по струму перетворити в ЦАП із виходом по напрузі. На рис. 7.3,а наведено схему ЦАП із ваговою резистивною матрицею, а на рис. 7.3,б ЦАП із ланцюговою $R - 2R$ матрицею., обидва із виходом по напрузі.

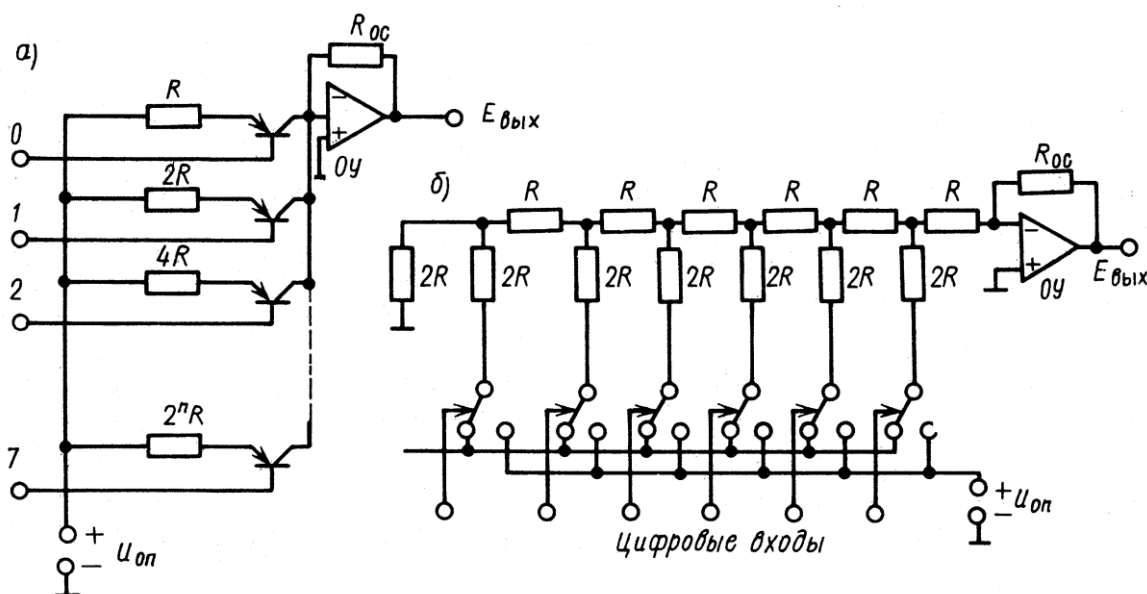


Рисунок 7.3

Основною характеристикою ЦАП є роздільна здатність, що визначається числом N розрядів. Теоретично ЦАП, що має N двійкових розрядів, повинен мати 2^N різних значень вихідного сигналу з роздільною здатністю $(2^N - 1)^{-1}$.

Абсолютне значення мінімального вихідного кванту визначається максимальним значенням $(2^N - 1)$ вхідного коду та максимальною вихідною напругою ЦАП (напруга шкали). Наприклад, при $N = 12$, $U_{иск} = 10$ В, абсолютна роздільна здатність ЦАП складає

$$10 / (2^N - 1) \text{ В} \approx 2,45 \text{ мВ.}$$

Особливого значення ЦАПи набули з появою мікропроцесорних вимірювальних приладів та систем.

8. МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Загальний метод зменшення похибок – *конструктивно-технологічний*. Його засновано на виявленні причин та джерел найбільш суттєвих похибок та всебічному зменшенні їх впливу. Тут використовують такі прийоми як термостатування, вживання малошумних компонент електронної техніки і т.п. Однак можливості метода обмежені, його застосування веде до здорожчання ЗВ. Тому поширення набули методи, засновані на введенні структурної та (чи) часової надмірності, тобто на введенні додаткових ЗВ та (чи) виконанні додаткових вимірювань, результати яких обробляються за спеціальним алгоритмом.

8.1. Метод негативного зворотного зв'язку

На рис.8.1 наведено структурну схему, що ілюструє даний метод.

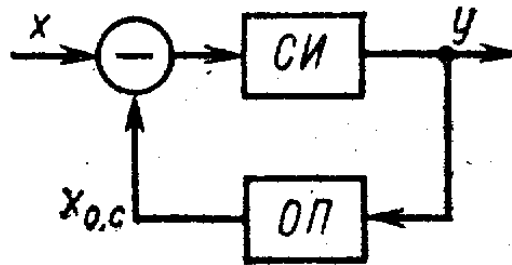


Рисунок 8.1

Тут *СИ* – основний засіб вимірювання, *ОП* – зворотній перетворювач. Зворотній перетворювач перетворює вихідну величину y у величину x_{oc} , фізично однорідну із вимірюваною величиною x . При використанні негативного зворотного зв'язку на вході *СИ* утворюється різниця $x - x_{oc}$. Нехай *СИ* та *ОП* мають лінійні функції перетворення

$$y = kx \text{ та } x_{oc} = \beta y,$$

де k та β коефіцієнти перетворення *СИ* та *ОП* відповідно.

При включенні негативного зворотного зв'язку отримаємо функцію перетворення

$$y = k_{oc}x,$$

де $k_{oc} = k / (1 + \beta k)$ – коефіцієнт перетворення із зворотним зв'язком.

Введення негативного зворотного зв'язку призвело до зменшення коефіцієнта перетворення в $(1 + \beta k)$ разів. Для глибокого зворотного зв'язку ($\beta k \gg 1$) отримуємо, $k_{oc} \approx 1/\beta$, тобто коефіцієнт передачі k_{oc} визначатиметься тільки коефіцієнтом передачі *ОП*.

Оцінимо похибку, викликану нестабільністю параметрів k та β .

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial y}{\partial \beta} \Delta \beta = \frac{x}{(1 + \beta k)^2} \Delta k - \frac{k^2 x}{(1 + \beta k)^2} \Delta \beta, \text{ або ж, переходячи}$$

до відносних похибок

$$\delta_y = \delta_k / (1 + \beta k) - \beta k \delta_\beta / (1 + \beta k),$$

$$\text{де } \delta_y = \Delta y / y, \quad \delta_k = \Delta k / k, \quad \delta_\beta = \Delta \beta / \beta.$$

Похибки δ_k і δ_β є відносні мультиплікативні похибки *СИ* та *ОП* відповідно. Зворотний зв'язок зменшує абсолютну адитивну похибку в $(1 + \beta k)$ разів, при цьому однак, відносна адитивна похибка незмінна.

Метод негативного зворотного зв'язку доцільно застосовувати, коли *ОП* значно точніший за *СИ*.

8.2. Метод допоміжних вимірювань

На рис.8.2 наведено структурну схему, що ілюструє даний метод.

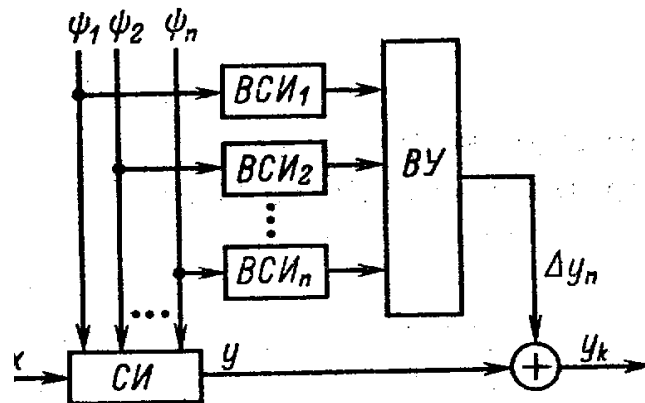


Рисунок 8.2

Тут *СИ* – основний засіб вимірювання; *ВСИ*₁, *ВСИ*₂, ..., *ВСИ*_n – допоміжні засоби вимірювань; *ВУ* – обчислювальний пристрій.

Допустимо, що похибка *СИ* зумовлена дією зовнішніх факторів $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$, а залежність цієї похибки від значень зовнішніх факторів відома

$$\Delta y = F(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n).$$

У даному випадку здійснюється корекція похибки *СИ* шляхом використання значень кожного із факторів ψ_i , отриманих з допомогою *ВСИ*₁, *ВСИ*₂, ..., *ВСИ*_n. За цими значеннями обчислювальний пристрій обраховує значення поправки Δy_n , що необхідна для корекції похибки.

Метод допоміжних вимірювань застосовують для зниження впливу тих дестабілізуючих факторів, що можуть бути легко враховані. Крім того, для здійснення корекції похибки необхідно знати залежність похибки *СИ* від

цих факторів. Недоліком є й необхідність використання окремих допоміжних засобів вимірювань для кожного фактора.

8.3. Ітераційні методи

Особливість ітераційних методів полягає в тому, що в процесі корекції похибки результат уточнюється кілька разів, причому кожен наступний результат отримують із попереднього. Отже, результат отримують шляхом послідовних наближень. Залежно від використаних у процесі корекції операцій розрізняють адитивні і мультиплікативні ітераційні алгоритми корекції. Ітераційний алгоритм підвищення точності може бути реалізовано або по черговим виконанням необхідних операцій (часове розділення), або майже одночасним виконанням операцій з допомогою додаткових функціональних блоків (просторове розділення операцій).

Розглянемо як приклад ітераційний алгоритм адитивної корекції з часовим розділенням операцій, що проілюстровано на рис. 8.3.

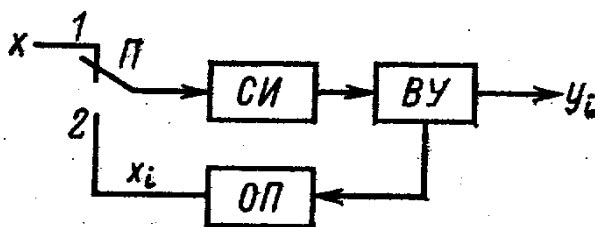


Рисунок 8.3

Окрім основного засобу вимірювань *СИ* маємо точний зворотний перетворювач *ОП* та обчислювальний пристрій *ВУ*. Процес корекції здійснюється наступним чином. Спочатку на вхід *СИ* подається вимірювана величина x , (перемикач *П* знаходиться в положенні 1), а відповідне значення вихідної величини y_0 запам'ятовується *ВУ*. Потім y_0 подається на вхід *ОП*, а вихід *ОП* підключається до входу *СИ* (перемикач *П* знаходиться в положенні 2). При цьому вихідна величина *СИ* приймає значення y'_0 , а *ВУ* обчислює першу поправку $\Delta y_1 = y_0 - y'_0$. Потім вже визначається перший скоригований результат $y_1 = y_0 + \Delta y_1$. На цьому завершується перший цикл ітераційної корекції.

Надалі y_1 подають на вхід *ОП*, вимірюють величину x_1 на його виході. Отримавши результат y'_1 , обраховують другу поправку $\Delta y_2 = y_1 - y'_1$ і другий скоригований результат $y_2 = y_0 + \Delta y_2$. При необхідності описаний циклічний процес корекції повторюють до досягнення необхідної точності.

Допустимо, що *СИ* має функцію перетворення

$$y = k(1 + \delta)x + \Delta,$$

де k – номінальний коефіцієнт перетворення; δ – відносна мультиплікативна похибка; Δ – абсолютна адитивна похибка.

Точний зворотний перетворювач повинен мати функцію перетворення

$$x_i = y_i / k.$$

Результат вимірювань після виконання n циклів корекції запишеться у виді

$$y_n = k[1 + (-1)^n \delta^{n+1}]x + (-1)^n \delta^n \Delta.$$

Очевидно, якщо $|\delta| < 1$, то із збільшенням числа n ітераційних циклів відбувається зменшення за абсолютним значенням як адитивної, так і мультиплікативної похибок.

Перевага ітераційних методів у тому, що з їх допомогою коригується загальна похибка засобів вимірювань незалежно від причин, що їх викликають.

Недолік – необхідність застосування точного зворотного перетворювача, що обмежує область використання методу головним чином вимірюваннями електричних величин.

8.4. Методи зразкових мір

Засновано на визначенні у процесі циклу вимірювань реальних значень параметрів функції перетворення ЗВ шляхом відключення від входу ЗВ вимірюваної величини і підключення зразкових мір.

У загальному випадку функція перетворення ЗВ із достатньою точністю описується поліномом $n - 1$ - го порядку

$$y = \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1}.$$

При цьому усі похибки ЗВ визначаються змінами параметрів d_i .

Процес вимірювання складається із $n + 1$ такту. У першому такті вимірюють величину x . Потім вимірювану величину відключають і в наступних тактах до входу ЗВ по чергово підключають міри M_1, M_2, \dots, M_n . Результати цих вимірів y_1, y_2, \dots, y_n сумісно із результатом y_0 першого тактового виміру утворюють систему рівнянь

$$\begin{cases} y_0 = \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1}; \\ y_1 = \sum_{i=1}^n d_i M_1^{i-1}; \\ \dots \\ y_n = \sum_{i=1}^n d_i M_n^{i-1}. \end{cases}$$

Останні n рівнянь цієї системи дозволяють обрахувати усі параметри d_1, d_2, \dots, d_n функції перетворення ЗВ. Підставляючи знайдені їх значення у перше рівняння системи, знаходимо значення вимірюваної величини.

У випадку лінійності функції перетворення ЗВ отримуємо систему трьох рівнянь із трьома невідомими d_1, d_2, x , розв'язок якої відносно x має вид

$$x = M_1 + (M_2 - M_1)(y_0 - y_1)/(y_2 - y_1).$$

При нелінійності функції перетворення ЗВ може бути використане її кусочне описання. Наприклад, при кусочно-лінійному представленні зв'язок поміж вихідною та вхідною величинами виражається залежністю

$$y = d_{1j} + d_{2j}x, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Тут m – число лінійних ділянок, котрими із необхідною точністю може бути апроксимована функція перетворення ЗВ.

Принцип методу при кусочно-лінійній апроксимації проілюстровано на рис. 8.4.

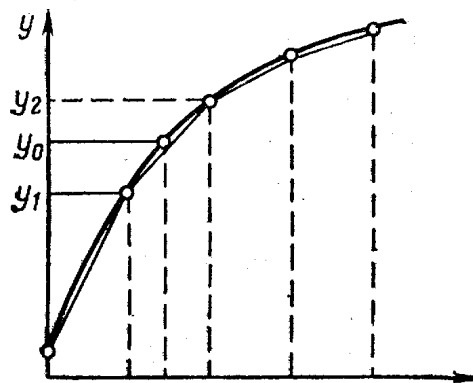


Рисунок 8.4

Методи зразкових мір дозволяють зменшити усі складові систематичної похибки ЗВ незалежно від причин їх виникнення.

Недоліком методу є необхідність періодичного відключення вимірюваної величини від входу ЗВ й підключення зразкових мір, а також велика кількість зразкових мір при суттєвій нелінійності функції перетворення ЗВ.

8.5. Тестові методи

Суть тестових методів підвищення точності полягає в тому, що протягом циклу вимірювань отримують інформацію не тільки про значення вимірюваної величини, але й про параметри функції перетворення ЗВ у момент виміру. На відміну від методу зразкових мір в тестових методах при додаткових вимірах використовують тести, сформовані за участі самої вимірюваної величини. Це дозволяє, по-перше, не відключати вимірювану

величину від входу ЗВ та, по-друге, використовувати малу кількість зразкових величин навіть при суттєвій нелінійності функції перетворення ЗВ.

Як вже зазначалося, у загальному випадку функція перетворення ЗВ описується поліномом порядку $(n-1)$, що містить n параметрів d_i . Цикл вимірювань складається з $n+1$ тактів. У першому такті вимірюється величина x , а в наступних n тактах – тести $A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)$, кожен із яких є деякою функцією вимірюваної величини x . Результати вимірів утворюють систему рівнянь

$$\begin{cases} y_0 = \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1}; \\ y_1 = \sum_{i=1}^n d_i [A_1(x)]^{i-1}; \\ \dots \\ y_n = \sum_{i=1}^n d_i [A_n(x)]^{i-1}. \end{cases}$$

Розв'язавши цю систему, отримуємо значення параметрів d_1, d_2, \dots, d_n та шуканої величини x . Тести, що реально використовуються на практиці, можна віднести до трьох груп: адитивні, мультиплікативні, функціональні.

Адитивні тести формуються у виді суми

$$A_j(x) = x + \theta_j,$$

де θ_j – зразкова величина, фізично однорідна із вимірюваною.

Мультиплікативні тести формуються у виді добутку

$$A_j(x) = k_j x,$$

де k_j – відомий коефіцієнт перетворення.

Зрозуміло, що адитивні та мультиплікативні тести є частковим випадком функціональних тестів, у котрих $A_j(x)$ являє собою довільну відому функцію. Найбільш широкого застосування набули адитивні й мультиплікативні тести.

В загальному випадку слід застосовувати як адитивні, так й мультиплікативні тести. Найпростіше значення x визначатиметься у випадку коли використовують один тест одного виду, а інші $n-1$ тестів – іншого.

Розглянемо як приклад використання кусочно-лінійної апроксимації функції перетворення ЗВ. У цьому випадку слід формувати два тести – адитивний й мультиплікативний. Відповідну структурну схему наведено на рис. 8.5.

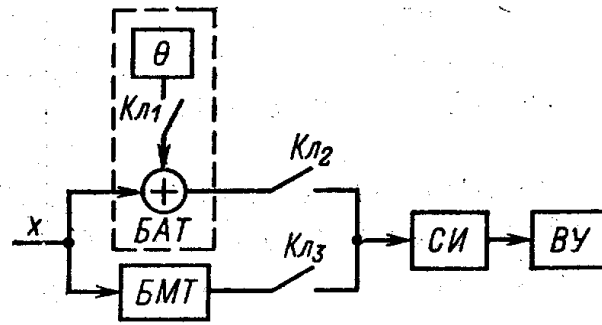


Рисунок 8.5

Окрім засобу вимірювань *СИ* та обчислювального пристрою *ВУ*, структурна схема включає ще блок формування адитивного тесту *БАТ*, блок формування мультиплікативного тесту *БМТ* та комутуючі ключі *Кл1*, *Кл2*, *Кл3*.

Процес вимірювань складається з трьох тактів. Протягом першого ключі *Кл1*, *Кл3* розімкнені, а ключ *Кл2* замкнено. На вхід ЗВ *СИ* подається вимірювана величина x . Протягом другого такту замикається ключ *Кл1* й на вхід ЗВ *СИ* подається адитивний тест $x + \theta$. Протягом третього такту ключ *Кл2* розімкнено, а *Кл3* замикається. На вхід ЗВ *СИ* подається мультиплікативний тест kx . Результати тактових вимірів може бути записано у виді системи

$$\begin{cases} y_0 = d_{1j} + d_{2j}x_2; \\ y_1 = d_{1j} + d_{2j}(x + \theta); \\ y_2 = d_{1j} + d_{2j}(kx). \end{cases}$$

Розв'язавши цю систему відносно x , отримуємо $x = \theta(y_2 - y_0)/(k - 1)(y_1 - y_0)$.

Обчислювальний пристрій запам'ятовує значення y_0, y_1, y_2 та обчислює значення x . Оскільки обчислене значення x не залежить від параметрів d_{1j}, d_{2j} функції перетворення ЗВ *СИ* на j -ій ділянці апроксимації, то виключаються адитивна й мультиплікативна похибки й суттєво зменшується похибка нелінійності ЗВ. Схему тактових вимірювань у відповідності з описаним алгоритмом наведено на рис. 8.6.

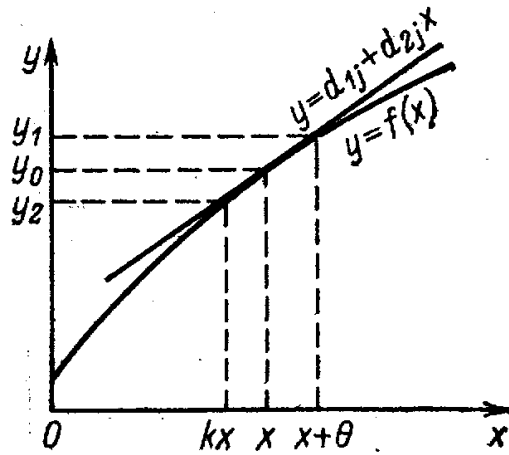


Рисунок 8.6

При зміні значення x й при постійних θ й k відбувається одночасне зміщення усіх трьох точок на нову ділянку апроксимації. Через це, незважаючи на нелінійність функції перетворення, необхідні лише дві точні величини: θ й k .

9. ЗАВАДИ. МЕТОДИ БОРОТЬБИ ІЗ ЗАВАДАМИ

9.1. Види завад, оцінка завадозахищеності

Засоби вимірювань, як правило, експлуатуються в умовах різного роду завад. Завади прийнято класифікувати за походженням. Тут розрізняють *природні* (розряди блискавки, а також розряди від електризації частинок – пилу, снігу, – в атмосфері Землі) та *індустріальні* завади (створюються промисловими установками, теле- й радіостанціями, електрообладнанням автотранспорту і т.п.). За *формою* завади будь-якого походження розрізняють як імпульсні, флуктуаційні та регулярні. По відношенню до ЗВ завади також можуть розглядатися як *зовнішні* та *внутрішні*.

Проте строга наукова класифікація завад ґрунтується на ознаці розміщення джерела завад по відношенню до вхідного сигналу (рис. 9.1). За цією ознакою розрізняють завади *нормального* та *загального* виду.

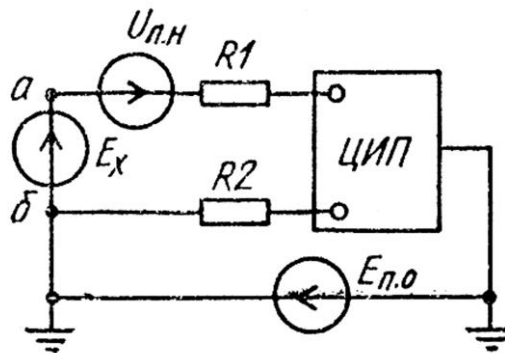


Рисунок 9.1

Завади нормального виду (послідовні, поперечні) u_{nn} діють послідовно із вхідним сигналом U_x й сумуються з ним. Джерелом завад нормального виду є е.р.с., що індукуються змінними магнітними полями у каналах зв'язку. Завада нормального виду u_{nn} подається на вхід приладу разом із вхідним сигналом U_x .

Завади загального виду (паралельні, поздовжні) E_{no} діють паралельно до вхідного кола приладу. Джерелом завад загального виду є різниця потенціалів між точками заземлення приладу й об'єкту вимірювань. Ця різниця потенціалів створюється головно струмами заземлення.

Для кількісної оцінки ефективності захисту від дії завад використовують коефіцієнт послаблення завад (коефіцієнт завадозахищеності)

$$K_n = 20 \log E_{n,вх} / E_{n,вых}, \text{ дБ.}$$

9.2. Борьба із завадами загального виду

Для зменшення впливу повздовжніх завад використовують ряд заходів. Провідним серед них є гальванічний розрив частин кола, що мають місця заземлення. Гальванічне розділення реалізується переважно з допомогою трансформаторів й роздільних конденсаторів. Останнім часом все більшого поширення знаходить гальванічне розділення з допомогою оптронів.

На рис. 9.2 проілюстровано використання роздільного (рис. 9.2,а) та компенсуючого (рис. 9.2,б) трансформаторів із зазначеною метою. Компенсуючий трансформатор має три обмотки L_1, L_2, L_3 . У його обмотках L_1, L_2 наводяться напруги, що компенсують вплив завади $E_{нд}$. Відомі компенсуючі трансформатори фірми Philips, індуктивність обмоток яких рівна 400 Гн, активний опір 240 Ом. Такі трансформатори дозволяють зменшити заваду загального виду частотою 50 Гц у 500 раз.

Другий поширений захід – симетрування вхідного вимірювального кола, проілюстровано на рис. 9.3.

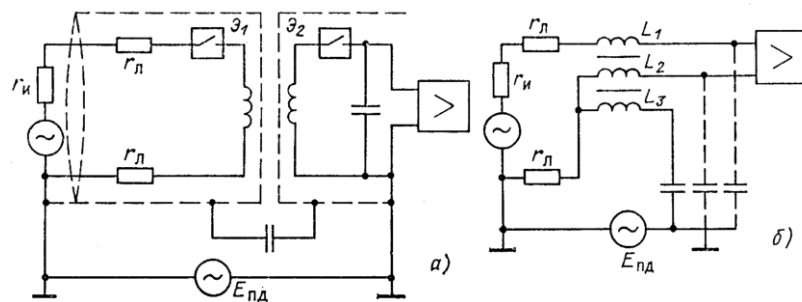


Рисунок 9.2

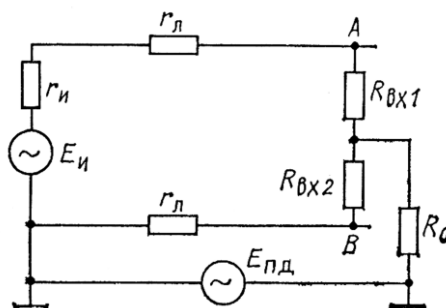


Рисунок 9.3

Вживання подібного роду мір дозволяє зменшити ємність вхідних зажимів ЗВ до рівня долей пФ, а коефіцієнт завадозахищеності по відношенню до завад загального виду довести до 120...160 дБ.

9.3. Боротьба із завадами нормального виду методом вагового інтегрування

Для зменшення впливу завад нормального виду застосовують фільтрацію та вагове інтегрування вхідного сигналу.

При інтегруванні визначається середнє значення сигналу на заданому інтервалі часу T

$$X_{cp} = \int_{-T/2}^{+T/2} X(t)F_g(t)dt,$$

де $F_g(t)$ – вагова функція.

Вимоги до вагової функції можуть бути сформульовані виходячи з характеру спектру сигналу $X(t)$. Для цього використовують рівність Парсеваля

$$\int_{-\infty}^{\infty} X(t)F_g(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)F_g(-j\omega)d\omega,$$

де $X(t)$, $F_g(t)$, $X(j\omega)$, $F_g(j\omega)$ – відповідно сигнал, вагова функція та їх амплітудно-частотні характеристики.

На рис. 9.4 наведено вид амплітудно-частотних характеристик вагових функцій в трьох основних випадках: а – завади з неперервним спектром у смузі від ω_H і вище; б – завади з дискретним спектром й подавленням її дискретних складових; в – завади із смугастим спектром й подавленням в заданих частотних зонах.

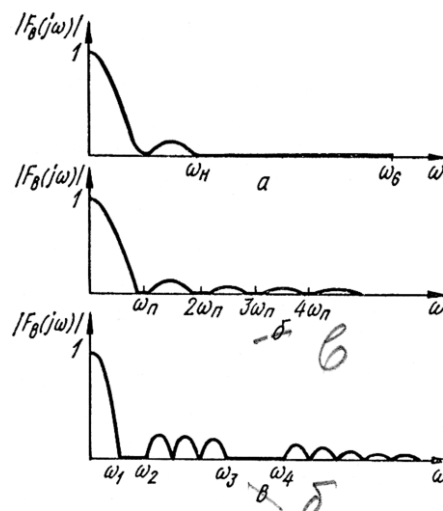


Рисунок 9.4

Відомі три способи реалізації вагового інтегрування:

- аналогове інтегрування результату перемноження сигналу $X(t)$ на сигнал $F_g(t)$;

- аналогове інтегрування результату перетворення сигналу у масштабному перетворювачі, коефіцієнт перетворення якого $K_{mn}(t)$ є ваговою функцією часу;
- цифрове інтегрування результату – перемноження значень ординат сигналу на значення ординат решітчастої вагової функції.

Розглянемо особливості подавлення завад нормального виду в цифрових вольтметрах двотактного інтегрування з прямокутною ваговою функцією (ВФ) залежно від частоти завади та часу інтегрування T .

Прямокутна однорівнева ВФ є найпростішою аналоговою ВФ. Вона ще називається функцією вікна або ж вікном Дирихле (рис. 9.5,а). Площа фігури вагової функції

$$F_g(t) = \Pi_T(t) = 1, -T/2 < t < T/2; \quad 0, t < -T/2, t > T/2.$$

ВФ Дирихле ніби вирізає із вхідного сигналу вікно, після цього він поступає на вхід інтегратора, де відбувається циклічне інтегрування.

АЧХ вікна Дирихле є функцією відліків (рис. 9.5,б)

$$F_g(j\omega) = \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2}.$$

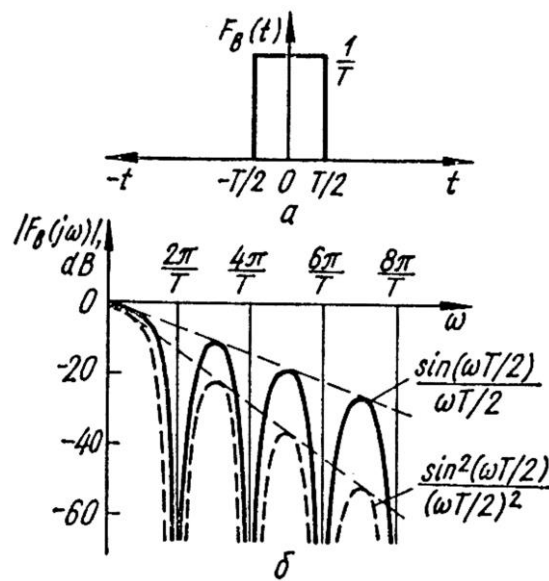


Рисунок 9.5

Огинаюча функції відліків обернено пропорційна частоті й при постійній частоті завади $f_n = 1/T_n$ коефіцієнт завадозахищеності в точках $2\pi/T_n, 4\pi/T_n, \dots, 2n\pi/T_n$ максимальний.

При виборі часу інтегрування $T = nT_n$, де $n = 1, 2, 3 \dots$ – ціле число, коефіцієнт завадозахищеності рівний нескінченості. В інтегруючих цифрових вольтметрах час T вибирається кратним періоду промислової завади 20 мс (50 Гц). Криву, що ілюструє зміну $K_{n,\min}$ залежно від n наведено на рис. 9.6.

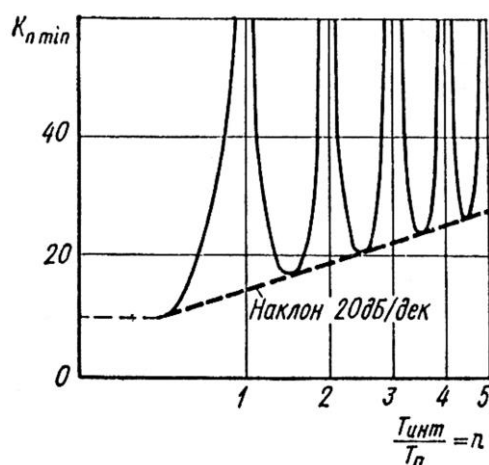


Рисунок 9.6

Детальний аналіз, однак, переконує, що навіть при незначних відхиленнях частоти завади f_n від її номінального значення $K_{n,\min}$ різко зменшується. Так, при $T = 0,02$ с, $f_n = 50$ Гц, відхилення частоти завади від номінального значення на 1 % призводить до зменшення завадозахищеності до 40 дБ. Із врахуванням нестабільності частоти завади збільшення часу інтегрування практично не веде до збільшення завадозахищеності.

У другому поколінні цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) двотактного інтегрування для збільшення завадозахищеності в умовах зміни f_n частоту квантуючого генератора змінюють залежно до зміни частоти завади $f_0 = kf_n$. Слідкування за частотою завади здійснюється схемами помноження частоти, зокрема схемою із фазовою автопідстройкою частоти (ФАПЧ). Автоматична підстройка забезпечує цілочисельне значення відношення $n = T/T_n$. Використання цього методу дозволяє зменшити похибку вимірів до похибки слідкування системою ФАПЧ. Наприклад, якщо похибка слідкування 0,01 %, то $K_{n,\min} = 80$ дБ. Практичний, однак, досвід використання інтегруючих ЦВП із ФАПЧ показав, що коефіцієнт завадозахищеності для них не перевищує 60 дБ. Такий рівень завадозахищеності вже може бути незадовільним у сучасних умовах.

У випадку коли задовільною є завадозахищеність на рівні до 60 дБ, значного розповсюдження набув метод заснований на тому, що перший такт інтегрування проводять у два етапи (рис. 9.7).

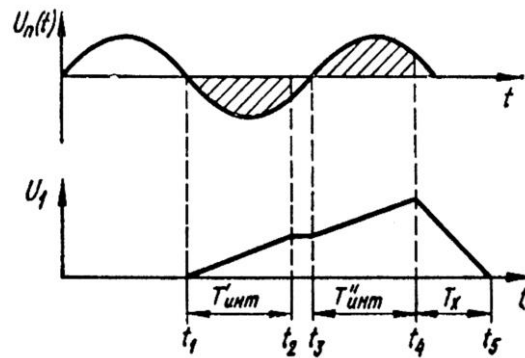


Рисунок 9.7

Якщо прийняти, що $T' = T'' < T_n / 2$, то при зміні T_n зміниться тільки інтервал $t_2 - t_3$. Оскільки результати інтегрування завади за T' та T'' мають протилежні знаки й однакові за величиною, її вплив різко зменшується. Реалізація цього методу вимагає точної привязки початку інтегрування до моменту переходу завади через нуль. Спосіб дозволяє при нестабільності частоти завади до 1 % додатково збільшити подавлення завади на 30 дБ.

У третьому поколінні інтегруючих ЦВП широко застосовують складні вагові функції. Наприклад, аналогові дворівневі й чотирирівневі прямокутні ВФ, гребінчасті ВФ, а також решітчасті ВФ.

Основний недолік інтеграторів із дворівневими ВФ – високі вимоги до похибки формування рівнів й низьке подавлення вищих гармонік. Тому ВФ вдосконалюють шляхом впровадження переважно гребінчастих ВФ.

Застосовують, наприклад, гребінчасту однорівневу ВФ, що складається із двох півкопій прямокутної вагової функції з площами по 0,5 та з центрами в точках $\pm 0,5\tau$ (рис. 9.8,а). Модуль АЧХ цієї ВФ

$$|F_6(j\omega)| = \left| \frac{\sin(\omega T / 2)}{\omega T / 2} \cos \omega \tau / 2 \right|$$

зображено на рис. 9.8,б при $\tau = 1,5T$. Дана вагова функція основну гармоніку f_n при уході її на 2 % подавляє на 55 дБ.

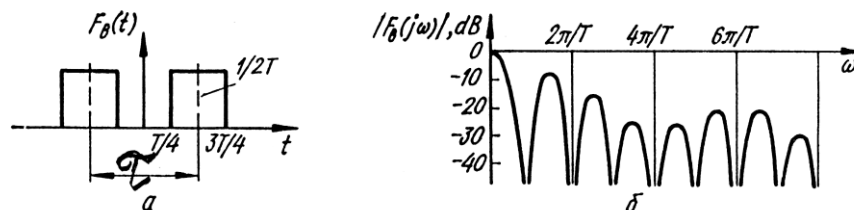


Рисунок 9.8

Відомі розробки ЦВП у яких використано гребінчасту ВФ із 10 компонентами – наприклад, у цифровому вольтметрі Ф4800.

Поширеною також є трикутна ВФ, або ж вікно Бартлета, утворена згорткою двох вагових функцій Дирихле (рис. 9.9)

$$F_{\theta}(t) = 1 - |t/T| \text{ при } 0 < t < T.$$

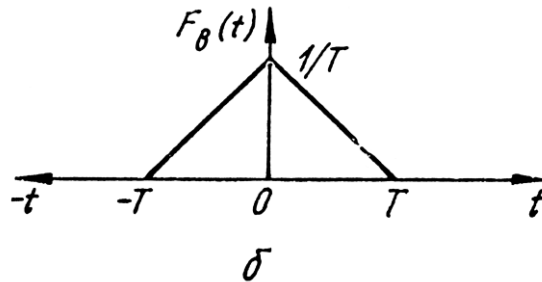


Рисунок 9.9

Модулем АЧХ вагової функції Бартлета є квадрат функції відліків

$$|F_{\theta}(j\omega)| = \left| \sin^2(\omega T / 2) / (\omega T / 2)^2 \right|.$$

При відхиленні частоти завади на 1...2 % коефіцієнт заводозахищеності складає відповідно 80 і 68 дБ для першої й вищих гармонік завади. Відтворити ж ВФ Бартлета із достатньою точністю порівняно складно.

Із розширенням сфери застосувань мікропроцесорів у ЦВП при ваговому інтегруванні починають використовуватися решітчасті вагові функції. У цьому випадку інтегрується вже не аналоговий сигнал, а результати вимірів миттєвих значень величин. Структура інтегратора у цьому випадку містить АЦП, масштабний перетворювач коду (подільник коду на 2 й на 4 для найпростіших решітчастих ВФ) та суматор.

Найпростішою решітчастою ВФ є симетрична пара дельта-функцій з масштабними коефіцієнтами 1/2 (рис. 9.10,а). Модуль АЧХ такої пари дельта-функцій із часовим інтервалом $T/2$

$$|F_{\theta}(j\omega)| = |\cos \omega T / 4|$$

наведено на рис. 9.10,б.

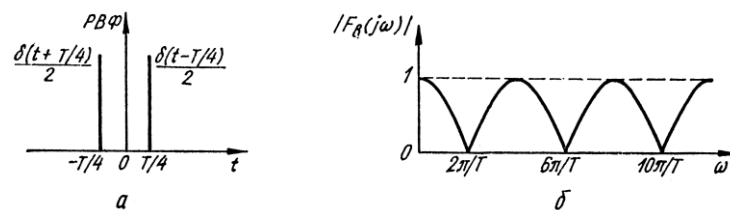


Рисунок 9.10

При зміні частоти завади на 1 % коефіцієнт заводозахищеності складає 36 дБ.

У ЦВП третього покоління широко застосовують комбінації, наприклад підстройку часу інтегрування, вагові функції, швидкодіючі фільтри.

9.4. Боротьба із завадами нормального виду методом фільтрації

Фільтрацією в широкому розумінні називається будь-яке перетворення вимірюваних сигналів з метою зміни співвідношення між їх різними компонентами. Таке перетворення може бути як лінійним, так і нелінійним. Більшість практичних результатів відносяться до лінійних фільтрів. Задовільною моделлю для більшості вимірюваних сигналів вважаються гаусові випадкові процеси, тобто процеси, густина розподілу ймовірності яких відповідає нормальному закону.

Лінійну динамічну систему, якою є фільтр, представимо передаточною функцією та імпульсною (перехідною) характеристиками.

Передаточна функція $H(j\omega)$ фільтра може бути визначена як відношення частотних спектрів вихідного й вхідного сигналів. Модуль передаточної функції $|H(j\omega)|$ називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ).

Дію фільтру в значній мірі визначає швидкість зміни АЧХ за межами смуги пропускання, тобто крутизна АЧХ

$$\kappa = d|H(j\omega)| / d\omega.$$

Відповідно логарифмічна крутизна

$\kappa = d \ln |H(j\omega)| / d \ln \omega$ (дБ/октава). Нагадаємо, що октава – одиниця виміру інтервалу частот, причому протягом однієї октави частота змінюється вдвічі.

Ідеальним фільтром нижніх частот називають фільтр зі смугою пропускання від нуля до деякої частоти ω_1 . Всередині інтервалу $(0, \omega_1)$ АЧХ ідеального фільтру стала, а поза – рівна нулеві. Відповідно ідеальний фільтр верхніх частот має смугу пропускання (ω_2, ∞) . Ідеальний смуговий фільтр має нульову АЧХ поза інтервалом (ω_1, ω_2) . Ідеальний режекторний (загороджуючий) фільтр має нульову АЧХ всередині інтервалу (ω_1, ω_2) . АЧХ ідеальних фільтрів мають нескінченну крутизну.

Реакція фільтра на вхідний одиничний імпульс називається імпульсною характеристикою $h(t)$. Для фізичної реалізації фільтрів необхідно аби виконувались наступні умови.

1. $h(t) = 0$ при $t < 0$. Це умова казуальності (причинно-наслідкового зв'язку).
2. $h(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Це умова затухання імпульсної характеристики з часом.
3. $\int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)| dt < \infty$. Це умова стійкості фільтру.

4. У спектральній області стійкість фільтру визначається критерієм Пелі-Вінера

$$\int_0^{\infty} \frac{\ln |H(j\omega)|}{1 + \omega^2} d\omega < \infty.$$

Відповідно до цього критерію фізично нездійсненний фільтр, АЧХ якого в деякій смузі частот має нульові значення. Отже ідеальні фільтри фізично нереалізуються.

Фільтри, що не задовільняють умовам фізичної реалізації, називають математичними фільтрами. Вони можуть бути здійснені у виді цифрової обробки сигналів.

9.4.1. Аналогова фільтрація

Із числа головних завдань фільтрації вимірювальних сигналів найбільший інтерес являють собою задачі виділення корисного сигналу на фоні завад. Можна вказати на наступні конкретні задачі цього плану:

- визначення детермінованого сигналу відомої форми на фоні завад;
- оцінка інформативних параметрів квазидетермінованих сигналів на фоні завад;
- фільтрація випадкових сигналів.

Визначення сигналів. Вважається, що випадковий процес є адитивна суміш корисного сигналу і завади. Якщо спектр сигналу рівний $S(j\omega)$, а спектральна густина енергії завади $W(j\omega)$, то оптимальний фільтр визначення має передаточну функцію

$$H(j\omega) = \frac{S^*(j\omega)}{W(j\omega)} e^{-j\omega t_0},$$

де $S^*(j\omega)$ – комплексно-спряжена до $S(j\omega)$ функція; t_0 – момент часу, в який відношення сигнал/завада досягає максимального значення.

Якщо завада являє собою незкорельований випадковий процес типу білий шум $W(j\omega) = C^2$, то з точністю до постійного множника передаточна функція оптимального фільтра визначається співвідношенням

$$H(j\omega) = S^*(j\omega).$$

Такий фільтр називається узгодженим. У часовій області узгодженому фільтру відповідає імпульсна характеристика

$$h(t) = x(t_0 - t).$$

Оцінка параметрів квазидетермінованих сигналів. Розглянемо задачу оцінки інформативного параметру A сигналу

$$x(t) = Au(t),$$

де $u(t)$ – відома функція часу, що описує форму сигналу, який спостерігається на фоні завад із спектральною густиною енергії $W(j\omega)$. Теорія статистичних рішень показує, що розглядувана задача розв'язується з допомогою оптимального фільтра, передаточна функція якого співпадає із

передаточною функцією фільтра виявлення. Структуру відповідної системи фільтрації наведено на рис. 9.11.

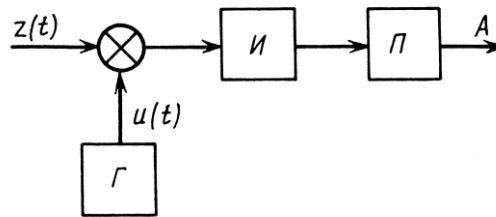


Рисунок 9.11

Вхідний сигнал $z(t)$, що є адитивна суміш сигналу $x(t)$ й завади, перемножується на зразковий сигнал $u(t)$, який формується генератором Γ в часовому інтервалі $(0, t_0)$, усереднюється в I та підсилюється в масштабному перетворювачі P . Вихідною величиною фільтра є оцінка параметра A сигналу $x(t)$.

Фільтрація випадкових сигналів. Якщо форма вхідного сигналу невідома, задача фільтрації реалізується на основі статистичного критерію, що забезпечує мінімум дисперсії відтворення корисного сигналу. Для цього необхідна апріорна інформація як про статистичний характер завади $\xi(t)$, так і про статистичні характеристики випадкового вхідного сигналу $x(t)$. Вихідний сигнал фільтра у цьому випадку зв'язаний із вхідним лінійним перетворенням $y(t) = L\{x(t)\}$. Це перетворення вибирають виходячи із умови задачі. Воно передбачається відомим. Наприклад, можна вимагати, аби вихідний сигнал співпадав із вхідним

$$y(t) = x(t).$$

Інша умова, яку використовують при екстраполяції сигналів, має вид

$$y(t) = x(t + \Delta t).$$

При $\Delta t > 0$ фільтр, що задовільняє цій умові, забезпечує прогнозування випадкового сигналу в момент часу $t + \Delta t$ за спотвореним завадою значеннями до моменту часу t .

У загальному випадку

$$z(t) = L\{x(t)\} + \xi(t),$$

де $\xi(t)$ – завада на виході фільтру.

Синтез фільтру у цьому випадку здійснюється відповідно до критерію

$$b^2 = M[z(t) - y(t)]^2 = \min.$$

Теорія статистичних рішень показує, що

$$H(j\omega) = \frac{W_x(j\omega)}{W_x(j\omega) + W_\xi(j\omega)},$$

де $W_x(j\omega)$ та $W_\xi(j\omega)$ – спектральні густини корисного сигналу й завади.

9.4.2. Цифрова фільтрація

Цифровий фільтр (ЦФ) являє собою цифровий пристрій, що реалізує в загальному випадку розв'язок рівняння в скінченних різницях наступного виду

$$y_k = \sum_{j=1}^{N-1} a_j y_{k-j} + \sum_{l=0}^{N-1} b_l x_{k-l},$$

де x_k, y_k – відліки вхідного й вихідного сигналів фільтра відповідно; a_j, b_l – константи.

Якщо відомі коефіцієнти a_j, b_l , відліки вхідного сигналу x_i при $i \geq -N + 2$ та початкові значення $y_{-1}, y_{-2}, \dots, y_{-N+1}$, то, використовуючи наведений вираз, можна розрахувати відліки y_i для будь-якого $i \geq 0$. Цифровий фільтр, що реалізує наведений алгоритм, називається *рекурсивним*. У більшості випадків алгоритм функціонування рекурсивного фільтра може бути представлено у простішому виді

$$y_k = b_1 x_k + \sum_{j=1}^{N-1} a_j y_{k-j}.$$

Якщо ж усі коефіцієнти a_j покласти рівними нулю, то отримаємо алгоритм *нерекурсивного* або ж *трансверсального* фільтра

$$y_k = \sum_{l=0}^{N-1} b_l x_{k-l}.$$

На відміну від трансверсального рекурсивний фільтр вимагає меншого числа операцій на один відлік, оскільки він використовує результати попередніх обчислень. Ця перевага змушує вишукувати можливість апроксимації необхідного фільтра рекурсивним.

Наприклад, для вирішення актуальної задачі обчислення поточного середнього на даному відрізку часу алгоритм функціонування трансверсального фільтра має вид

$$y_k = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} x_{k-l}.$$

Тут на кожен відлік y_k необхідно виконати N операцій сумування. Та ж задача може бути вирішена з допомогою рекурсивного фільтра

$$y_k = y_{k-1} + \frac{x_k - x_{k-N-1}}{N}.$$

Отже, можна обчислити поточне середнє значення сигналу, використовуючи тільки три операції сумування замість N .

За останні роки з'явилися спеціалізовані процесори в інтегральному виконанні для обробки вимірвальних сигналів, що містять у своєму складі АЦП на вході та ЦАП на виході, що дозволяють використовувати методи цифрової фільтрації при обробці аналогових сигналів без додаткових апаратних затрат.

ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ НА ІСПИТ

1. Роль і значення вимірювальної техніки. Основні поняття і визначення.
2. Види та методи вимірювань.
3. Класифікація і характеристики засобів вимірювання.
4. Структури засобів вимірювань.
5. Класифікація похибок вимірювань.
6. Нормування ЗВ за похибками.
7. Класи точності засобів вимірювань.
8. Еталони.
9. Міри електричних величин.
10. Пасивні вимірювальні перетворювачі II роду. Шунти.
11. Пасивні вимірювальні перетворювачі II роду. Подільники напруги.
12. Пасивні вимірювальні перетворювачі II роду. Вимірювальні трансформатори змінного струму.
13. Активні вимірювальні перетворювачі II роду. Підсилювач. Зворотний зв'язок у підсилювачах.
14. Активні вимірювальні перетворювачі II роду. Підсилювачі змінного струму. Підсилювачі постійного струму.
15. Вимірювальні перетворювачі I роду. Параметричні вимірювальні перетворювачі.
16. Вимірювальні перетворювачі I роду. Генераторні вимірювальні перетворювачі.
17. Аналого-цифрового та цифро-аналогові перетворювачі. Основні поняття і визначення.
18. Принципи аналого-цифрового перетворення.
19. Цифро-аналогові перетворювачі.
20. Методи зменшення похибок вимірювань. Метод негативного зворотного зв'язку.
21. Методи зменшення похибок вимірювань. Метод допоміжних вимірювань.
22. Методи зменшення похибок вимірювань. Ітераційні методи.
23. Види завад, оцінка завадозахищеності.
24. Боротьба із завадами загального виду.
25. Боротьба із завадами нормального виду методом вагового інтегрування.
26. Боротьба із завадами нормального виду методом фільтрації.
27. Боротьба із завадами нормального виду методом фільтрації. Аналогова фільтрація.
28. Боротьба із завадами нормального виду методом фільтрації. Цифрова фільтрація.

Література

1. К.Л.Куликовский, В.Я.Купер. Методы и средства измерений. М.,Э., 1986.
2. Т.М.Алиев, А.А.Тер-Хачатуров. Измерительная техника. М., ВШ, 1991.
3. Ф.Мейзда. Электронные измерительные приборы и методы измерений. М., Мир, 1990.
4. П.П.Орнатский. Автоматические измерения и приборы. К., ВШ, 1986.
5. П.П.Орнатский. Теоретические основы ИИТ. К., ВШ, 1983.
6. Цюцюра С. В. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація: Навч. посібник для вузів / С. В. Цюцюра, В. Д. Цюцюра. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К. : Знання, 2005. — 242 с. — (Вища освіта ХХІ століття). — ISBN 966-8148-67-3.
7. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986.
8. Björck, Åke (1996). Numerical methods for least squares problems. Philadelphia: SIAM. ISBN 0-89871-360-9.
9. Greene, William H. (2002). Econometric analysis (5th ed.). New Jersey: Prentice Hall.
10. Метод найменших квадратів // Вища математика в прикладах і задачах: Навчальний посібник. 2-ге видання. — К.: Центр учбової літератури / Клепко В.Ю., Голець В.Л.. — 2009. — С. 358. — 594 с.