

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О.С. Захарченко
В.П. Смирнов

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Конспект лекцій

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
172 Електронні комунікації та радіотехніка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Мовчанюк А.В.*, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Мартинюк С.Є.*, кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри радіоінженерії

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 19.01.2023 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 15/2022 від 19.12.2022 р.)*

*Захарченко Оксана Степанівна, ст. викладач кафедри радіоінженерії
Смирнов Володимир Павлович, старший викладач кафедри фізико-технічних
засобів захисту інформації*

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ. НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Основи метрології: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / О.С. Захарченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 3.858 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с.

Видання друге, доповнене. Посібник містить теоретичний матеріал з дисципліни «Основи метрології» з таких розділів, як теорія похибок, основи теорії електромагнітних кіл, вимірювальні пристрої в радіотехніці. Посібник розраховано на студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка та буде корисний для усіх слухачів, які хочуть отримати теоретичні знання з основ метрології.

© Захарченко О.С., Смирнов В.П.
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. МЕТРОЛОГІЯ ТА ЇЇ ЗНАЧЕННЯ У НАУКОВО-ТЕХНІЧНОМУ ПРОГРЕСІ.....	8
1.1 Метрологія: основні поняття та визначення.....	8
1.2 Значення метрології для науково-технічного прогресу та промисловості.....	9
1.3 Актуальні проблеми метрології	10
1.4 Питання для самоперевірки.....	11
2 ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ОДИНИЦІ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ	12
2.1 Фізичні величини.....	12
2.2 Поняття про систему фізичних величин	14
2.3 Принципи побудови Міжнародної системи одиниць СІ.....	15
2.4 Основні одиниці СІ.....	16
2.5 Питання для самоперевірки.....	19
3 ВИДИ І МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ, ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	21
3.1 Види вимірювань	21
3.2 Методи вимірювань.....	22
3.3 Поняття про точність вимірювань	24
3.4 Основи забезпечення єдності вимірювань.....	24
3.5 Еталони одиниць фізичних величин.....	24
3.6 Питання для самоперевірки.....	26
4 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ.....	27
4.1 Поняття про похибки вимірювань	27
4.2 Класифікація похибок вимірювання	27
4.3 Систематичні похибки	28
4.4 Випадкові похибки	30
4.4.1. Випадкові величини. Закони розподілу випадкових величин	31
4.4.2. Закон розподілу випадкової величини	31
4.5 Грубі похибки і промахи.....	36
4.6 Питання для самоперевірки:.....	37

5	ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОЦІНКА ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ	38
5.1	Визначення результату однократних вимірів.....	38
5.2	Визначення результату вимірів з багаторазовими спостереженнями	39
5.3	. Визначення результату непрямих вимірів	40
5.4	. Результат виміру	40
5.5	Питання самоперевірки:.....	41
6	ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛАХ	42
6.1	Основні поняття теорії електромагнітних кіл (ЕМК).....	42
6.2	Елементи електромагнітних кіл, їх властивості та моделі	43
6.3	Опис та класифікація з'єднань елементів у ЕМК	48
6.4	Основні закони, що пов'язують струми і напруги у ЕМК.	49
6.5	Еквівалентні перетворення електричних схем	51
6.6	Еквівалентні схеми реальних елементів ЕМК.....	52
6.7.	Питання для самоперевірки	56
7	МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАНЬ	57
7.1	Вимірювання часових інтервалів.....	57
7.2	Похибки вимірювача часових інтервалів.....	60
7.3	Питання для самоперевірки.....	63
8	ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ.....	64
8.1	Основні положення	64
8.2	Метод перезаряду конденсатора.....	64
8.3	Резонансний метод вимірювання частоти	65
8.4	Метод порівняння невідомої частоти з частотою зразкового генератора	66
8.4.1	Осцилографічний спосіб порівняння частот	67
8.4.2	Гетеродинний метод	68
8.4.3	Цифровий метод вимірювання частоти	71
8.5	Питання для самоперевірки.....	74
9	ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ.....	75
9.1	Загальні положення	75
9.2	Вимірювані параметри напруги	75

9.3	Основні метрологічні та експлуатаційні характеристики вольтметрів ..	77
9.4	Методи і засоби вимірювання напруги	78
9.4.1	Аналогові вольтметри сталої напруги	79
9.4.2	Цифрові вольтметри сталої напруги	81
9.5	Принципи побудови вольтметрів змінної напруги	85
9.6	Питання для самоперевірки.....	88
10	. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ.....	90
10.1	Загальні положення	90
10.2	Вимірювання потужності в діапазонах низьких і високих частот	91
10.3	Питання для самоперевірки.....	99
11	ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ	100
11.1	Основні визначення.....	100
11.2	Осцилографічні методи вимірювання	101
11.3	Компенсаційні методи вимірювання	102
11.4	Тригерні методи вимірювання фазового зсуву	103
11.5	Цифрові фазометри	105
11.6	Питання для самоперевірки.....	105
12	ОСЦИЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ КОЛИВАНЬ	106
12.1	Загальна характеристика.....	106
12.2	Узагальнена структурна схема універсального осцилографа.....	106
12.3	Види осцилографічних розгорток.....	108
12.4	Індикаторний пристрій.....	111
12.5	Стробоскопічний перетворювач осцилографа	113
12.6	Питання для самоперевірки.....	114
13	ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ	115
13.1	Загальні положення	115
13.2	Низькочастотні аналогові генератори	117
13.3	Високочастотні аналогові генератори.....	120
13.4	Генератори надвисоких частот.....	121
13.5	Цифрові вимірювальні генератори інфранизьких і низьких частот .	121
13.6	Синтезатори частоти	123

13.7 Генератори імпульсних коливань	124
13.8 Генератори шумових коливань	125
13.9 Генератори шумоподібних коливань	127
13.10 Питання для самоперевірки.....	129
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	127

ВСТУП

Нема сумнівів, що однією з найважливіших питань під вимірювань, випробувань та досліджень в будь якій науці, техніці та сучасності є достовірність даних, точність вимірювань та правильно поставлений експеримент.

Сучасна наука розвивається дуже швидко і, відповідно, вимоги до вимірювальної техніки також швидко зростають. Обладнання стає складним і високоточним. Досліджуванні сигнали давно перейшли в область терагерців і, відповідно, вимірювальна техніка стала такою. Метрологія, як наука, повинна забезпечити потрібну точність вимірювань.

Це видання навчального посібника є доповненим та розширеним [1]. Навчальна дисципліна «Основи метрології» (ОМ) є однією з дисциплін циклу загальної підготовки фахівців спеціальності 172 Електронні комунікації.

Метою вивчення дисципліни ОМ є ознайомлення з основними поняттями вимірювань, похибками, видами сигналів та основними методами оброблення вимірювальної інформації щодо параметрів радіотехнічних пристроїв. Від вибору вимірювальної техніки в першу чергу залежить результат досліджень. І саме тому велику долю в викладеному матеріалі займають ознайомлення з вимірювальними приладами.

1. МЕТРОЛОГІЯ ТА ЇЇ ЗНАЧЕННЯ У НАУКОВО-ТЕХНІЧНОМУ ПРОГРЕСІ

1.1 МЕТРОЛОГІЯ: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Галузь науки, яка вивчає вимірювання, називається метрологією. Слово "метрологія" утворене із двох грецьких слів: "metron" — міра і "logos" — наука. Дослівний переклад — наука про міри.

Довгий час метрологія була описовою наукою про різні міри та співвідношення між ними. Лише завдяки прогресу фізичних та точних наук метрологія набула суттєвого розвитку у забезпеченні єдності і точності вимірювань фізичних величин, кількість яких дедалі збільшувалася, та щодо якості цих вимірювань. Великий вклад у становлення сучасної метрології як науки внесли вітчизняні вчені: Б.С. Якобі, В.Я. Струве, А.Я. Купфер, В.С. Глухов, Д.І. Менделєєв, Н.Г. Єгоров, Л.В. Залуцький, Л.І. Кременчуцький, Б.І. Руденко, І.П. Глибін та ін.

Особливо слід підкреслити значну роль Д.І. Менделєєва у розвитку метрології. Його роботи з вимірювання маси і температури, а також щодо впровадження метричної системи залишаються актуальними і сьогодні.

Метрологія в її сучасному розумінні — це наука про вимірювання, методи та засоби забезпечення єдності вимірювань і способи досягнення необхідної точності їх.

Єдність вимірювань — стан вимірювань, коли результати виражені у прийнятих одиницях, а похибки вимірювань прийняті із заданою ймовірністю. Єдність вимірювань необхідна для порівняння результатів вимірювань, проведених у різних місцях, в різний час, з використанням різних методів і засобів вимірювання. Результати при цьому повинні бути однаковими, незалежно від використання методів і засобів вимірювання. Так, маса в 1 кг чи інша одиниця фізичної величини повинна бути адекватною у різних місцях, при вимірюванні різними засобами, методами та експериментаторами.

Точність вимірювань означає максимальну наближеність їх результатів до істинного значення вимірюваної величини.

Таким чином, одним із головних завдань метрології є забезпечення єдності і необхідної точності вимірювань на підприємствах галузі і держави.

У більшості держав світу заходи щодо забезпечення єдності і необхідної точності вимірювань устанавлюються (закріплюються) законодавчо: шляхом ухвалення одиниць вимірювань, регулярних повірок технічних, зразкових та еталонних засобів, випробування нових засобів вимірювання, підготовки кадрів тощо.

Одним із розділів метрології є законодавча метрологія, яка вивчає комплекс взаємопов'язаних і взаємообумовлених загальних правил, вимог і

норм експлуатації, повірку, обслуговування, виготовлення та зберігання засобів вимірювання, а також інші завдання, які контролюються і регламентуються державою з метою забезпечення єдності вимірювань і одноманітності засобів вимірювань.

Основні визначення і поняття у метрології закріплені законодавчою метрологією, що обумовлює єдиний підхід до визначення змісту основних наукових положень і визначень (ДСТУ 2681—94).

1.2 ЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЇ ДЛЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПРОГРЕСУ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

Метрологія має важливе значення для науково-технічного прогресу, оскільки без вимірювань, без постійного підвищення їх точності неможливий розвиток жодної з галузей науки і техніки. Завдяки точним вимірюванням стали можливими численні фундаментальні відкриття. Наприклад, вимірювання густини води з підвищеною точністю обумовило відкриття у 1932 р. важкого ізотопу водню — дейтерію, мізерний вміст якого у звичайній воді здатний збільшувати її густину.

Розвиток науки і промисловості стимулював розвиток вимірювальної техніки, а удосконалення вимірювальної техніки, у свою чергу, активно впливали на розвиток багатьох галузей науки і техніки.

Жодне наукове дослідження чи процес виробництва не може обійтися без вимірювань, без вимірювальної інформації. Ні в кого немає сумніву відносно того, що без розвитку методів і засобів вимірювання прогрес у науці і техніці неможливий.

Сучасні досягнення у галузі радіоелектроніки були б неможливі без нових технологій і високоточних вимірювань товщини шарів напилення у мікросхемах і чистоти напівпровідників. Впровадження нових технологій ґрунтується на нових засобах вимірювань, принципи роботи яких розроблені з урахуванням останніх наукових досягнень і відкриттів.

Розвиток сучасного наукового експерименту при дослідженні космосу, елементарних частинок матерії, складних технологічних процесів і об'єктів залежить від своєчасного і якісного збору вимірювальної інформації, від необхідного рівня і випереджаючого розвитку засобів вимірювання.

Поряд з метрологією формувалися теоретичні основи вимірювальної техніки в цілому та окремих видів вимірювань, наприклад, електричні, оптичні, механічні. Нові засоби вимірювальної техніки розробляються на основі сучасних досягнень у галузі математики, фізики, радіоелектроніки, біології, теорії автоматичного управління, теорії зв'язку тощо. Перелічені галузі науки у свою чергу використовують досягнення теорії вимірювань, метрології, вимірювальної техніки. Так, спеціалісти обчислювальної техніки

розробляють аналогово-цифрові перетворювачі, вимірювальні комутатори і відповідне метрологічне забезпечення.

До недавнього часу засоби вимірювальної техніки обмежувалися показувальними та автоматичними приладами для вимірювання окремих технологічних параметрів. В останні роки у зв'язку з різним рівнем інтенсифікації і автоматизації сучасних технологічних процесів підхід до вимірювань суттєво змінився. Виникла потреба у своєчасному одержанні, опрацюванні й записах потоків вимірювальної інформації, що зумовило виникнення інформаційно-вимірювальних систем, здатних відтворювати на екранах дисплея повну інформацію про стан об'єкта, давати поради оператору, відображати значення того чи іншого параметра і прогнозувати подальшу його зміну.

Для забезпечення науково-технічного прогресу метрологія повинна випереджати у своєму розвитку інші галузі науки, бо для кожної з них точні вимірювання і достовірна інформація є основоположними.

1.3 АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ МЕТРОЛОГІЇ

Науково-технічний прогрес прямо пов'язаний з інтенсивним розвитком метрології і точних вимірювань, необхідних як для розвитку природних і точних наук, так і для створення нових технологій та вдосконалення засобів технічного контролю. Все це ставить перед метрологією низку важливих і невідкладних завдань.

У галузі одиниць вимірювань одним із важливих завдань є уніфікація їх на базі широкого впровадження Міжнародної системи одиниць (СІ). Незважаючи на універсальність цієї системи, ще багато одиниць вимірювання є позасистемними і потребують систематизації та уніфікації.

Значно підвищуються вимоги до засобів вимірювання найвищого рівня — еталонів. Точність вимірювання у промисловості у багатьох випадках наближається до граничних технічних меж. На черзі використання знань фундаментальних наук, атомних сталей (енергетичних переходів, випромінювань та ін.), які характеризуються високою стабільністю, для розробки нових, більш досконаліх і точних еталонів, а також засобів вимірювальної техніки.

Зросли вимоги до самої системи передачі розміру одиниці фізичної величини від еталона зразковим засобам вимірювання, а від них — технічним засобам за умови найменшої втрати точності, особливо у промислових процесах. Сучасні еталони і способи передачі розміру одиниці фізичної величини мають бути бездоганними і відповідати вимогам еталона.

Невідкладним завданням є забезпечення точних вимірювань досить малих і достатньо великих значень тиску, температури, частоти, витрат та інших параметрів.

Розвиток інформаційно-вимірювальних систем на базі електронно-обчислювальних машин потребує розробки нового метрологічного забезпечення таких систем і розробки теорії вимірювання такими системами.

Актуальною сьогодні є проблема розробки інтелектуальних датчиків і на їх базі систем автоматичного контролю, прогнозування та діагностики складних технологічних процесів та наукових досліджень.

Як наукова основа вимірювальних систем метрологія повинна забезпечувати надійність, достовірність і правильність вимірювальної інформації, а також законодавчо регламентувати єдність вимірювань у державі, єдність методів і одноманітність засобів контролю за технологічними процесами і продукцією. Метрологія, узагальнюючи практичний досвід вимірювань, регулює розвиток вимірювальної техніки та методів вимірювань.

1.4 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке метрологія?
2. Що таке єдність вимірювань?
3. Значення метрології для науково-технічного прогресу?
4. Що таке точність вимірювань?

2 ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ОДИНИЦІ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

2.1 ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ

Технологічна діяльність людини пов'язана з вимірюванням різних фізичних величин. Фізична величина - це характеристика однієї з властивостей фізичного об'єкта (явища або процесу), загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта.

Значення фізичної величини - це оцінка її величини у вигляді деякої кількості прийнятих для неї одиниць або числа за прийнятою для неї шкалою. Наприклад, 120 мм - значення лінійної величини, 75 кг - значення маси тіла, HB190 - число твердості за Брінелем.

Вимірюванням фізичної величини називають сукупність операцій, виконуваних за допомогою технічного засобу, що зберігає одиницю, або відтворює шкалу фізичної величини, що полягають в порівнянні (в явному або неявному вигляді) вимірюваної величини з її одиницею або шкалою з метою отримання значення цієї величини у формі виміру, найбільш зручного для використання.

У теорії вимірювань прийнято в основному п'ять типів шкал: найменування, порядку, інтервалів, відносин і абсолютна.

Шкали найменувань характеризуються тільки відношенням еквівалентності. За своєю суттю вона є якісною, не містить нуля і одиниці вимірювання. Прикладом такої шкали є оцінка кольору за найменуваннями (атласи кольорів). Так як кожен колір має безліч варіацій, то таке порівняння може виконати тільки досвідчений експерт, що володіє відповідними зоровими можливостями.

Шкали порядку характеризуються відношенням еквівалентності і порядку. Для практичного використання такої шкали необхідно встановити ряд еталонів. Класифікація об'єктів здійснюється шляхом порівняння інтенсивності властивості з його еталонним значенням. До шкал порядку відносяться, наприклад, шкала землетрусів, шкала сили вітру, шкала твердості тіл тощо.

Шкала різниць відрізняється від шкали порядку тим, що крім відносин еквівалентності і порядку додається еквівалентність інтервалів (різниць) між різними кількісними проявами властивості. Вона має умовні нульові значення, а величина інтервалів встановлюється за погодженням. Характерним прикладом такої шкали є шкала інтервалів часу. Інтервали часу можна підсумувати (віднімати). Шкали відносин описують властивості, до яких застосовні відносини еквівалентності, порядку та підсумовування, а отже,

віднімання та множення. Ці шкали мають природне нульове значення, а одиниці вимірювань встановлюються за погодженням.

Для шкали відносин досить одного еталону, щоб розподілити всі досліджувані об'єкти за інтенсивністю вимірюваної властивості. Прикладом шкали відносин є шкала маси. Маса двох об'єктів дорівнює сумі мас кожного з них.

Абсолютні шкали мають всі ознаки шкал відносин, але додатково в них існує природне однозначне визначення одиниці виміру. Такі шкали відповідають відносним величинам (відносинам однойменних фізичних величин, описуваних шкалами відносин). Серед абсолютних шкал виділяються абсолютні шкали, значення яких знаходяться в межах від 0 до 1. Такий величиною є, наприклад, коефіцієнт корисної дії.

Більшість властивостей, які розглядають в метрології, описується одновимірними шкалами. Проте є властивості, опис яких може бути виконано тільки із застосуванням багатовимірних шкал. Наприклад, тривимірні шкали кольору в колориметрії. Практична реалізація шкал конкретних властивостей досягається шляхом стандартизації одиниць вимірювань, шкал і (або) способів і умов їх однозначного відтворення.

Поняття незмінної для будь-яких точок шкали одиниці вимірювань має сенс тільки для шкал відносин і інтервалів (різниць). У шкалах порядку можна говорити тільки про числа, які приписані конкретним проявам властивості. Говорити про те, що такі числа відрізняються в таке-то число разів або на стільки-то відсотків, не можна. Для шкал відносин і різниць іноді недостатньо встановити тільки одиницю вимірювань. Так, навіть для таких величин, як час, температура, сила світла (та інші світлові величини), яким в Міжнародній системі одиниць СІ відповідають основні одиниці - секунда, Кельвін і кандела, практичні системи вимірювань спираються також на спеціальні шкали. Крім того, самі одиниці у ряді випадків базуються на фундаментальних фізичних константах.

У цьому зв'язку можна виділити три види фізичних величин, вимірювання яких здійснюється за різними правилами.

До першого виду фізичних величин відносяться величини, на множині розмірів яких визначені лише відносини порядку та еквівалентність. Це відносини типу "м'якше", "твердіше", "тепліше", "холодніше" тощо. До величин такого роду відносяться, наприклад, твердість, тобто здатність тіла чинити опір проникненню в нього іншого тіла; температура як ступінь нагрівання тіла тощо. Існування таких відносин встановлюється теоретично або експериментально за допомогою спеціальних засобів порівняння, а також на основі спостережень за результатами впливу фізичної величини на які-небудь об'єкти.

Для другого виду фізичних величин відношення порядку та еквівалентність має місце як між розмірами, так і між різницями в парах їх розмірів. Так, різниці інтервалів часу вважаються рівними, якщо відстані між відповідними відмітками рівні.

Третій вид складають адитивні фізичні величини. Адитивними фізичними величинами називаються величини, на множині розмірів яких визначені не тільки відносини порядку та еквівалентність, але і операції додавання та віднімання. До таких величин відносяться довжина, маса, сила струму тощо. Їх можна вимірювати по частинах, а також відтворювати за допомогою багатозначної міри, заснованої на підсумовуванні окремих вимірів. Наприклад, сума мас двох тіл - це маса такого тіла, яке врівноважує на рівноплечих вагах перші два.

2.2 ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМУ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Множина фізичних величин являє собою деяку систему, в якій окремі величини пов'язані між собою тими, чи іншими рівняннями. Система фізичних величин - це сукупність взаємопов'язаних фізичних величин, утворена відповідно до прийнятих принципів, коли одні величини приймаються за незалежні, а інші є функціями незалежних величин.

Система фізичних величин містить основні фізичні величини, умовно прийняті в якості незалежних від інших величин цієї системи, і похідні фізичні величини, що визначаються через основні величини цієї системи.

Основна фізична величина - це фізична величина, що входить в систему одиниць і умовно прийнята в якості незалежної від інших величин цієї системи. Похідна одиниця системи одиниць - одиниця похідної фізичної величини системи одиниць, утворена у відповідності з рівнянням, що зв'язує її з основними одиницями. Похідна одиниця називається когерентною, якщо в цьому рівнянні числовий коефіцієнт, що зв'язує величини, дорівнює одиниці. Відповідно, система одиниць, що складається з основних одиниць і когерентних похідних, називається когерентною системою одиниць фізичних величин.

Для кожної фізичної величини повинна бути встановлена одиниця виміру. Одиниця фізичної величини - фізична величина фіксованого розміру, якій умовно присвоєно значення, що дорівнює одиниці, і застосовувана для кількісного вираження однорідних фізичних величин.

Крім основних і похідних фізичних величин розрізняють кратні, поточні, когерентні, системні та позасистемні одиниці. Число незалежно встановлених величин дорівнює різниці числа величин, що входять в систему, і числа незалежних рівнянь зв'язку між величинами. Наприклад, якщо швидкість тіла визначається за формулою $V = y/t$, то незалежно можна встановити тільки дві величини, а третю одержати через них.

Розмірність фізичної величини - вираз у формі одночлена, складеного з добуток символів основних фізичних величин в різних ступенях, який відображає зв'язок даної величини з фізичними величинами, прийнятими в даній системі величин за основні, з коефіцієнтом пропорційності, що дорівнює одиниці. Ступені символів основних величин, що входять до одночлену, можуть бути цілими, дробовими, додатними і від'ємними. Розмірність величин позначають знаком \dim

$$\dim X = L^a M^b T^g$$

де a, b, g – показники розмірності, які є цілими числами.

Якщо всі показники ступеня розмірності дорівнюють нулю, то така фізична величина називається безрозмірною. Всі відносні величини (відношення однойменних величин) є безрозмірними.

2.3 Принципи побудови Міжнародної системи одиниць СІ

Перша система одиниць фізичних величин, хоч вона і не була ще системою одиниць у сучасному розумінні, була прийнята Національними зборами Франції 1791 року. Вона містила одиниці довжини, площі, об'єму і маси, основними з яких були дві одиниці: метр і кілограм.

Систему одиниць як сукупності основних і похідних одиниць вперше 1832 року запропонував німецький учений К.Ф. Гаус. Він побудував систему одиниць, де за основу прийняв одиниці довжини (міліметр), маси (міліграм) і часу (секунда), і назвав її абсолютною системою. З розвитком фізики і техніки з'явилися інші системи одиниць фізичних величин, що базуються на метричній основі. Всі вони були побудовані за принципом, розробленим Гаусом. Ці системи знайшли застосування в різних галузях науки і техніки. Розроблені в той час вимірювальні засоби градуйовані у відповідних одиницях, знаходять застосування і в даний час. Розмаїття одиниць вимірювання фізичних величин і систем одиниць ускладнювало їх застосування. Одні й ті ж рівняння між величинами мали різні коефіцієнти пропорційності. Властивості матеріалів, процесів виражалися різними числовими значеннями. Міжнародний комітет з мір та ваг виділив зі свого складу комісію з метою розроблення єдиної міжнародної системи одиниць. Комісія розробила проект Міжнародної системи одиниць, який був затверджений XI Генеральною конференцією з мір та ваг 1960 року. Прийнята система була названа Міжнародною системою одиниць, скорочено СІ [2] (SI - початкові букви найменування System International). Зміни визначень основних одиниць Міжнародної системи одиниць (SI), які набули чинності у 2019 році, полягають у тому, що усі основні одиниці SI стали визначатись через фіксовані значення фундаментальних фізичних констант. При цьому величини цих одиниць залишились незмінними, однак з їх визначень остаточно зникли прив'язки до

матеріальних еталонів. Зміни такого роду пропонувались давно, однак лише на початку XXI століття це стало можливим. Остаточне рішення про зміни було ухвалене XXVI Генеральною конференцією з мір і ваг у 2018 році. Враховуючи необхідність охоплення Міжнародною системою одиниць всіх галузей науки і техніки, в ній в якості основних обрані сім одиниць.

У механіці такими є одиниці довжини, маси і часу, в електриці додається одиниця сили електричного струму, в теплоті - одиниця термодинамічної температури, в оптиці - одиниця сили світла, в молекулярній фізиці, термодинаміці і хімії - одиниця кількості речовини. Ці сім одиниць відповідно: метр, кілограм, секунда, ампер, Кельвін, кандела і моль - і обрані в якості основних одиниць СІ.

2.4 Основні одиниці СІ

В системі СІ обрано сім визначальних констант, через які може бути виражена будь-яка одиниця СІ:

- частота надтонкого розщеплення основного стану атома цезію-133 $\Delta\nu_{Cs}$ точно дорівнює 9192631770 Гц;
- швидкість світла у вакуумі c точно дорівнює 299792458 м/с;
- стала Планка h точно дорівнює $6,62607015 \times 10^{-34}$ кг·м²·с⁻¹;
- елементарний електричний заряд e точно дорівнює $1,602176634 \times 10^{-19}$ А·с;
- стала Больцмана k точно дорівнює $1,380649 \times 10^{-23}$ Дж/К;
- стала Авогадро N_A точно дорівнює $6,02214076 \times 10^{23}$ моль⁻¹;
- світлова віддача K_{cd} монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Гц точно дорівнює 683 лм/Вт.

Одиниця довжини (метр) - визначається фіксацією числового значення швидкості світла у вакуумі $c = 299\,792\,458$ в одиницях м·с⁻¹, де секунда визначається через частоту випромінювання що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Одиниця маси (кілограм) - визначається через сталу Планка h , яка точно дорівнює $6,62607015 \times 10^{-34}$ Дж·с (Дж = кг·м²·с⁻²), та визначення метра і секунди.

Одиниця часу (секунда) - встановлюється через фіксування числового значення частоти надтонкого розщеплення основного стану атома цезію-133 за температури 0 К, що дорівнює точно 9192631770, коли вона виражена одиницею СІ с⁻¹, що еквівалентна Гц.

Одиниця сили електричного струму (ампер) - сила незмінного струму, який, проходячи по двох прямолінійних провідниках нескінченної довжини і нескінченно малої площі круглого поперечного перерізу, розташованих на відстані 1 м один від іншого у вакуумі, викликає між провідниками силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини.

Одиниця термодинамічної температури (Кельвін) - $1/273$, термодинамічної температури потрійної точки води. Допускається використовувати також шкалу Цельсія.

Одиниця сили світла (кандела) - сила світла в заданому напрямку джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить $1/683$ Вт / порівн.

Одиниця кількості речовини (моль) - кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів міститься у вуглеці-12 масою $0,012$ кг.

Основні одиниці Міжнародної системи мають зручні для практичних цілей розмірності і широко застосовуються у відповідних областях вимірювань. Міжнародна система одиниць містить також дві додаткові одиниці: для плоского кута - радіан і для тілесного кута - стерадіан.

Радіан (рад) - одиниця плоского кута, що дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу. У градусному обчисленні $1 \text{ рад} = 57^\circ 1744,8''$.

Стерадіан (ср) - одиниця, рівна тілесному куту з вершиною в центрі сфери, вирізаний на поверхні сфери площу, рівну площі квадрата зі стороною, рівною радіусу сфери. Тілесний кут вимірюють опосередковано - шляхом вимірювання плоского кута а при вершині конуса з наступним обчисленням за формулою

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right]$$

Тілесному куту в 1 ср відповідає плоский кут, рівний $65^\circ 32'$, куту 2π ср - плоский кут 180° .

У рішеннях XI і XII Генеральних конференцій з мір та ваг дано 33 похідні одиниці СІ. Приклади похідних одиниць, що мають власні найменування, наведено в табл. 2.1. Важливий принцип, втілений в Міжнародній системі одиниць, є її когерентність (узгодженість). Так, вибір основних одиниць системи забезпечив повну узгодженість механічних і електричних одиниць. Наприклад, ват - одиниця механічної потужності (рівний джоулю в секунду) дорівнює потужності, що виділяється електричним струмом силою I ампер при напрузі U вольт. У СІ, подібно іншим когерентним систем одиниць, коефіцієнти пропорційності у фізичних рівняннях, що визначають похідні одиниці, дорівнюють безрозмірній одиниці.

Таблиця 2.1. Похідні одиниці системи СІ

Назва		Позначення		Фізична величина	Вираження	
українська	міжнародна	українська	міжнародна		через інші одиниці СІ	через основні одиниці СІ
герц	hertz	Гц	Hz	частота		s^{-1}
ньютон	newton	Н	N	сила		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
паскаль	pascal	Па	Pa	тиск	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
джоуль	joule	Дж	J	енергія, робота	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
ват	watt	Вт	W	потужність, потік енергії	$Дж/с$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
кулон	coulomb	Кл	C	електричний заряд	$A \cdot s$	$s \cdot A$
вольт	volt	В	V	напруга, електричний потенціал	$Вт/А$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
фарад	farad	Ф	F	електрична ємність	$Кл/В$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
ом	ohm	Ом	Ω	електричний опір	$В/А$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
сіменс	siemens	См	S	електропровідність	$А/В$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
вебер	weber	Вб	Wb	магнітний потік	$В \cdot с$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
тесла	tesla	Тл	T	магнітна індукція	$Вб/м^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
генрі	henry	Гн	H	індуктивність	$Вб/А$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
градус Цельсія	degree Celsius	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	термодинамічна температура		K

У Міжнародній системі одиниць, як і в інших системах одиниць фізичних величин, важливу роль відіграє розмірність. Розмірністю називають символічне (буквене) позначення залежності похідних величин (або одиниць) від основних. Наприклад, якщо яка-небудь фізична величина виражається через довжину L , масу M і час T (що є основними величинами в системі одиниць типу LMT) формулою $X = f(L, M, T)$, то можна показати, що результати вимірювань будуть незалежні від вибору одиниць в тому випадку, якщо функція f буде однорідною функцією довжини, маси і часу.

Таблиця 2.2. Кратні і частинні одиниці ФВ

кратні				частинні			
Множник	Назва	Позначення		Множник	Назва	Позначення	
		українське	міжнародне			українське	міжнародне
10^1	(дека)	да	da	10^{-1}	(деци)	д	d
10^2	(гекто)	г	h	10^{-2}	(санти)	с	c
10^3	кіло	к	k	10^{-3}	мілі	м	m
10^6	мега	М	M	10^{-6}	мікро	мк	μ
10^9	гіга	Г	G	10^{-9}	нано	н	n
10^{12}	тера	Т	T	10^{-12}	піко	п	p
10^{15}	пета	П	P	10^{-15}	фемто	ф	f
10^{18}	екса	Е	E	10^{-18}	ато	а	a
10^{21}	зета	З	Z	10^{-21}	зепто	з	z
10^{24}	йота	Й	Y	10^{-24}	йокто	й	y

Розмірність служить якісною характеристикою величини і виражається результатом дії основних величин, через які може бути визначена. Розмірність у повному обсязі відбиває всі якісні особливості величин. Зустрічаються різні величини, що мають однакову розмірність. Наприклад, робота і момент сили, сила струму і магніторушійна сила тощо. Розмірність грає важливу роль під час перевірки правильності складних розрахункових формул. Основними перевагами Міжнародної системи одиниць є:

- Уніфікація одиниць фізичних величин на базі СІ. Для кожної фізичної величини встановлюється одна одиниця і система освіти кратних і часткових одиниць від неї за допомогою множників (табл. 2.2);

- Система СІ є універсальною системою. Вона охоплює всі галузі науки, техніки і галузі економіки;

- Основні і більшість похідних одиниць СІ мають зручні для практичного застосування розміри. В системі розмежовані одиниці маси (кілограм) і сили (ньютон);

- Спрощується запис рівнянь і формул у різних галузях науки і техніки. У СІ для всіх видів енергії (механічної, теплової, електричної тощо) встановлена одна, загальна одиниця - джоуль.

2.5 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке фізична величина?

2. Що таке система фізичних величин?
3. Що таке система СІ?
4. Які є основні фізичні величини системи СІ?
5. Що таке розмірність фізичної величини?

3 ВИДИ І МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ, ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

3.1 Види вимірювань

Для вимірювання фізичної величини необхідно створити ряд умов [3]:

- можливість виділення вимірюваної величини серед інших величин;
- можливість встановлення одиниці, необхідної для вимірювання виділеної величини;
- можливість матеріалізації (відтворення та зберігання) встановленої одиниці технічними засобами;
- можливість збереження незмінним розміру одиниці (у межах встановленої точності) як мінімум на термін, необхідний для вимірювань.

Рівноточні виміри - це ряд результатів вимірювань фізичної величини, виконаних однаковими за точністю засобами вимірювань і в одних і тих же умовах.

Нерівноточні виміри - це ряд результатів вимірювань, виконаних різними за точністю засобами вимірювань і (або) у різних умовах. Нерівноточні виміри обробляють з метою отримання результату вимірювань тільки в тому випадку, коли неможливо отримати ряд рівноточних вимірів.

Одноразовий вимір - це результат вимірювання, виконаного тільки один раз.

Багаторазовий вимір - це вимір одного й того ж розміру фізичної величини, результат якого отримано з кількох наступних одне за одним вимірювань, тобто складається з ряду одноразових вимірів. При чотирьох вимірах і більше, що входять в ряд, вимірювання можна вважати багаторазовим. За результат багаторазового вимірювання зазвичай приймають середнє арифметичне значення сукупності окремих вимірів.

Статичний вимір - це вимір фізичної величини, прийнятої за незмінну протягом часу вимірювання. Наприклад, вимір діаметра деталі при нормальній температурі.

Динамічний вимір - це вимір, що змінюється за розміром фізичної величини і, якщо необхідно, її зміни в часі. Наприклад, вимірювання змінної напруги електричного струму.

Технічні вимірювання - це вимірювання за допомогою робочих засобів вимірювань. Застосовуються з метою контролю і управління. Наприклад, вимірювання діаметра деталей у ході технологічного процесу.

Метрологічні вимірювання - це вимірювання за допомогою еталонів та зразкових засобів вимірювань з метою відтворення одиниць фізичних величин для передачі їх розміру робочим засобам вимірювань.

Абсолютний вимір - це вимір, заснований на прямих вимірюваннях однієї або декількох основних величин і (або) використанні значень фізичних констант. Наприклад, вимірювання ваги засноване на вимірюванні основної величини - маси і використанні фізичної сталої g (в точці вимірювання маси).

Відносне вимірювання - це вимірювання відношення величини до однойменної величини, що відіграє роль одиниці, або зміни величини по відношенню до однойменної величини, прийнятої за вихідну.

Прямі вимірювання - це вимірювання, що проводяться прямим методом, при якому шукане значення величини отримують безпосередньо. Наприклад, вимірювання довжини штангенциркулем або мікрометром, кута - кутоміром тощо.

Непрямі вимірювання - це вимірювання, що проводяться непрямим методом, при якому шукане значення фізичної величини визначається на підставі результатів прямих вимірювань інших фізичних величин, функціонально пов'язаних з шуканою величиною. Наприклад, визначення об'єму прямокутного паралелепіпеда за значеннями його ширини, довжини і висоти за відомим рівнянням.

Сукупні вимірювання - це вимірювання декількох однойменних величин, які проводяться одночасно, при яких шукані значення величин визначають шляхом розв'язання системи рівнянь, одержуваних при вимірах різних сполучень цих величин. Наприклад, необхідно визначити розміри фізичних величин A , B і C , але нема засобів, які дали б можливість виміряти безпосередньо ці величини. Є засоби, що дозволяють визначити суми будь-яких двох з вказаних величин. Тоді, вимірюючи різні поєднання величин, отримаємо x , y , z - результати вимірювання відповідних пар розмірів величини. Вирішивши систему рівнянь, можна визначити шукані величини A , B і C .

Спільні вимірювання - це вимірювання двох або декількох неодноїменних величин для визначення залежності між ними, які проводяться одночасно. Наприклад, на підставі ряду одночасних вимірювань приросту довжини зразка залежно від змін його температури (отриманих в результаті вимірювань) визначають коефіцієнт лінійного розширення зразка. За своєю суттю, спільні вимірювання нічим не відрізняються від непрямих вимірювань.

3.2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ

Метод вимірювання - прийом або сукупність прийомів порівняння вимірюваної фізичної величини з її одиницею відповідно до реалізованого принципу вимірювань. Тут під принципом вимірювань розуміється фізичне явище або ефект, покладені в основу вимірювання тим або іншим типом засобів вимірювань. Наприклад, застосування ефекту Доплера для вимірювання швидкості, сили тяжіння при вимірювання маси зважуванням. Метод вимірювань звичайно обумовлений побудовою засобів вимірювань.

Розрізняють такі основні методи вимірювань:

- безпосередньої оцінки,
- порівняння з мірою,
- диференційний,
- контактний
- безконтактний.

Метод безпосередньої оцінки - метод вимірювань, в якому значення величини визначають безпосередньо, зчитуючи з відлікового пристрою вимірювального приладу. Наприклад, одержання розміру за допомогою штангенциркуля або мікрометра, сили електричного струму за допомогою амперметра тощо.

Метод порівняння з мірою - метод вимірювань, в якому вимірювану величину порівнюють з величиною, що відтворюється мірою. Наприклад, вимірювання маси на важільних вагах з врівноважуванням гирями (еталонами маси з відомими значеннями).

Диференціальний метод вимірювань - метод, при якому вимірювана величина порівнюється з однорідною величиною, що має відоме значення, яке незначно відрізняється від вимірюваної величини, при якому вимірюється різниця між цими двома значеннями. Метод має кілька різновидів. В тому числі.

Нульовий метод вимірювань - метод порівняння з мірою, коли в процесі підбору величини міри досягається нульове значення різниці між вимірюваною величиною і величиною підбраної міри. Вимір дорівнює величині підбраної міри. Наприклад, вимірювання опору за допомогою моста опорів.

Метод вимірювання заміщенням - метод порівняння з мірою, у якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, що відтворюється мірою. Наприклад, на чашку ваг, призначену для зважування маси, встановлюють повний комплект гир і врівноважують ваги довільним вантажем. Потім на чашку з гирями поміщають зважувальну масу і знімають частину гир для відновлення рівноваги. Сумарне значення маси знятих гир відповідає значенню маси, що зважується (спосіб Д.І. Менделєєва).

Контактний метод вимірювань - метод, заснований на тому, що чутливий елемент приладу приводиться в контакт з об'єктом вимірювання. Наприклад, контроль температури термометром.

Безконтактний метод вимірювання - метод, заснований на тому, що чутливий елемент приладу не приводиться в контакт з об'єктом вимірювання. Наприклад, вимірювання температури пірометром.

Вибір того чи іншого методу вимірювань визначається призначенням їх результатів та вимогами до точності.

3.3 ПОНЯТТЯ ПРО ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ

Точність результату вимірювання - характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля похибки його результату. Ці похибки є наслідком багатьох причин: недосконалість методу вимірювань, засобів вимірювань, досвіду оператора, недостатньою ретельності проведення вимірювання, впливу зовнішніх умов тощо. Для зменшення похибок необхідно усунути або зменшити вплив кожної з причин їх появи.

Точність вимірювань зазвичай характеризується похибкою вимірювання. Для оцінки ступеня наближення результатів вимірювання до істинного значення вимірюваної величини використовуються методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

Використання методів, розроблених в рамках теорії ймовірностей і математичної статистики дозволяє з певною достовірністю оцінити межі, за які не виходять величини похибок, що дає можливість для кожного конкретного випадку вибрати засоби і методи вимірювання.

3.4 ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

Спеціалізація і кооперування виробництва в масштабах країни, засновані на принципах взаємозамінності, вимагають забезпечення і збереження єдності вимірювань.

Єдність вимірювань - стан вимірювань, за якого їх результати виражені в узаконених одиницях величин і похибки вимірювань не виходять за встановлені межі із заданою вірогідністю. Поняття "єдність вимірювань" охоплює найважливіші завдання метрології: уніфікацію одиниць, розробку систем відтворення одиниць і передачі їх розмірів робочим засобам вимірювань з встановленою точністю, проведення вимірювань з похибкою, що не перевищує встановлені межі тощо.

Єдності вимірювань необхідно дотримуватися при будь-якій точності вимірювань, необхідної у конкретній галузі економіки. Забезпечення єдності вимірювань є завданням метрологічних служб.

Метрологічна служба - сукупність суб'єктів діяльності та видів робіт, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань.

3.5 ЕТАЛОНИ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Засіб вимірювань або комплекс засобів вимірювань, призначені для відтворення та зберігання одиниці величини та передачі її розміру нижчим за повірочною схемою засобам вимірювань і затверджені як еталон в установленому порядку, є еталоном одиниці фізичної величини.

Конструкція еталону, його фізичні властивості і спосіб відтворення визначаються природою фізичної величини (одиниця, яка відтворюється) і рівнем розвитку вимірювальної техніки в даній галузі вимірювань. Еталон

повинен мати такі суттєві ознаки: незмінність, відтворюваність і порівнюваність.

Незмінність еталону - властивість еталону утримувати незмінним розмір відтворюваної ним одиниці протягом тривалого часу, а всі зміни, що залежать від зовнішніх умов (температура, вологість, тиск тощо), повинні бути строго визначеними функціями величин, доступних точному вимірюванню.

Відтворюваність еталону - можливість відтворення одиниці фізичної величини з найменшою похибкою для даного рівня розвитку вимірювальної техніки.

Порівнюваність еталону - можливість забезпечення звірення з еталоном інших засобів вимірювань, що стоять нижче за повірочною схемою, з найвищою точністю для даного рівня розвитку техніки вимірювань.

Розрізняють такі види еталонів: первинний; спеціальний; державний; вторинний; еталон-свідок; еталон-копія; еталон порівняння; робочий еталон; міжнародний еталон тощо.

Під первинним еталоном розуміється еталон, що забезпечує відтворення одиниці з найвищою в країні (в порівнянні з іншими еталонами тієї ж величини) точністю.

Державний еталон одиниці величини - еталон одиниці величини, визнаний рішенням уповноваженого на те державного органу в якості вихідного на території країни. Для того щоб забезпечити відтворення одиниць з максимально можливою точністю, державні еталони постійно удосконалюються. Для забезпечення єдності вимірювань фізичних величин в міжнародному масштабі важливу роль відіграють міжнародні звірення національних державних еталонів. Ці звірення допомагають виявити систематичні похибки відтворення одиниці національними еталонами, виявити, наскільки національні еталони відповідають міжнародному рівню, і намітити шляхи вдосконалення національних (державних) еталонів.

В якості вторинного еталону використовується еталон, який отримує розмір одиниці шляхом звірень з первинним еталоном розглянутої одиниці. Вторинний еталон є підлеглим по відношенню до первинного еталону.

Еталон-свідок - вторинний еталон, призначений для перевірки збереження і незмінності державного еталону і для заміни його у разі псування або втрати. В даний час тільки еталон кілограма має еталон-свідок. Основне призначення еталону-свідка посилити впевненість в сталості основного еталону.

Еталон-копія - це вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці робочим еталонам. Такі еталони створюються у разі великого числа повірочних робіт з метою запобігання передчасного зношування первинного або спеціального еталону. Еталон-копія є копією державного еталону тільки з метрологічної точки зору і може не завжди бути фізичною копією державного еталону. При необхідності еталон-копія може замінити державний еталон.

Еталон порівняння - це вторинний еталон, який застосовується для звірень еталонів, які з тих чи інших причин не можуть бути безпосередньо порівнювані один одному.

Основне призначення еталону-свідка - посилити впевненість в сталості основного еталону. По суті, за допомогою еталону-свідка можна лише констатувати сталість або зміну співвідношення між одиницями, відтворюваними еталоном-свідком і первинним еталоном. Можна також з певним ступенем достовірності стверджувати, що в разі постійності цих співвідношень розміри одиниць, відтворюваних еталонами, залишаються незмінними.

Робочий еталон - це вторинний еталон, який застосовується для передачі розміру одиниці зразковим засобам вимірювань вищої точності, і, в окремих випадках, - найбільш точним робочим засобам вимірювань. Робочі еталони є найбільш поширеними вторинними еталонами.

Міжнародний еталон - це еталон, прийнятий за міжнародною угодою в якості первинного міжнародного еталону і використовується для узгодження з ним розмірів одиниць, відтворюваних і збережених національними еталонами.

3.6 Питання для самоперевірки

1. Що таке еталон фізичної величини?
2. Як забезпечується єдність вимірювань ФВ?
3. Чим характеризується точність вимірювань?
4. Які є методи вимірювань ФВ?

4 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

4.1 ПОНЯТТЯ ПРО ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

Всякий процес вимірювання незалежно від умов, в яких його проводять, пов'язаний з похибками, які спотворюють уявлення про дійсне значення вимірюваної величини [4]. Джерелами появи похибок при вимірюваннях можуть служити різні фактори, основними з яких є недосконалість конструкції засобів вимірювань або принципової схеми методу вимірювання, неточність виготовлення засобів вимірювань, недотримання зовнішніх умов під час вимірювань, суб'єктивні похибки тощо.

4.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

Похибкою засобів вимірювань називається відхилення його відліку (вихідного сигналу) від вимірюваної величини (вхідного сигналу), що діє на вхід засобу вимірювання.

Похибки, що виникають у процесі вимірювань, можна розділити на систематичні і випадкові. Крім цього, в процесі вимірювання можуть з'явитися грубі (дуже великі) похибки, а також можуть бути допущені промахи.

До систематичних похибок відносять складову похибки вимірювань, яка залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж величини. Як правило, систематичні похибки можуть бути в більшості випадків вивчені до початку вимірювань, а результат вимірювання може бути уточнений за рахунок внесення поправок, якщо їх числові значення визначені, або за рахунок використання таких способів вимірювань, які дають можливість виключити вплив систематичних похибок без їх визначення.

До випадкових похибок вимірювання відносять складові похибки вимірювань, які змінюються випадковим чином при повторних вимірах однієї й тієї ж величини. На відміну від систематичних похибок випадкові похибки не можна усунути заздалегідь. Однак уточнити результат вимірювання можна за рахунок проведення повторних вимірювань, тобто знайти значення вимірюваної величини, більш близьке до істинного, ніж результат одного вимірювання.

Ці похибки є наслідком, наприклад, змін зовнішніх умов вимірювань випадкового характеру, змін показання вимірювального приладу, похибки округлення при знятті відліку тощо.

Промахами і грубими похибками називають похибки вимірювання, які значно перевищують очікувані за даних умов вимірювань систематичні або випадкові похибки. Якщо результати вимірювань використовуються в розрахунках, то перед цим необхідно усунути вимірювання, що містять грубі похибки. Основними причинами цих похибок є: помилки експериментатора;

різка і несподівана зміна умов вимірювання; несправність приладу тощо. Для виявлення грубих похибок використовуються методи математичної статистики.

4.3 СИСТЕМАТИЧНІ ПОХИБКИ

Систематичні похибки при повторних вимірах залишаються постійними або змінюються за певним законом. Ці похибки в деяких випадках можна визначити експериментально, а отже, отриманий результат вимірювання може бути уточнений шляхом введення поправки.

Відомий ряд способів виключення систематичних похибок, які умовно можна розділити на чотири основні групи:

- усунення джерел похибок до початку вимірювань;
- виключення похибок в процесі вимірювання способами заміщення, компенсації похибок за знаком, протиставлення, симетричних спостережень;
- внесення відомих поправок до результату вимірювання (вилучення похибок обчисленням);
- оцінка меж систематичних похибок, якщо їх не можна вилучити.

За характером прояви систематичні похибки поділяються на постійні, прогресивні і періодичні.

Постійні систематичні похибки - похибки, які протягом усього часу вимірювань зберігають своє значення. Наприклад, якщо для вимірювання деякої величини використовується шкала приладу, в градуюванні якої є похибка, то така похибка переноситься на всі результати вимірювання. Постійні похибки можуть бути вилучені шляхом калібрування вимірювального пристрою за допомогою еталону.

Прогресивні похибки - похибки, які змінюються з плином часу. До таких похибок можна віднести, наприклад, похибки, що виникають внаслідок зносу контактуючих деталей засобів вимірювання, поступового падіння напруги джерела, що живить вимірювальне коло тощо.

Періодичні похибки - похибки, значення яких є періодичною функцією часу або функцією переміщення покажчика вимірювального приладу. Такі похибки зустрічаються в індикаторах годинникового типу (приладах з круговою шкалою і стрілкою). Наприклад, якщо вісь стрілки індикатора зсунута відносно центру шкали на деяку величину, то похибка змінюється за синусоїдальним законом Систематичні похибки можуть змінюватися також складним чином за рахунок спільної дії декількох систематичних похибок.

До групи систематичних похибок можна віднести: інструментальні похибки; похибки через неправильну установку вимірювального пристрою; похибки, що виникають внаслідок зовнішніх впливів; похибки методу вимірювання (теоретичні похибки); суб'єктивні похибки.

Інструментальними похибками називають похибки, причина яких полягає у властивостях застосовуваних засобів вимірювань. Наприклад,

рівноплечі ваги не можуть бути ідеально рівноплечими. Причиною інструментальних похибок є також тертя в сполученнях рухомих деталей приладів. Засобам вимірювань, які мають шкалу, притаманні похибки, що виникають внаслідок неточності нанесення відміток шкали (похибки градування). Інструментальні похибки можуть з'являтися внаслідок зносу міри у разі використання методу порівняння з мірою. Величина зносу залежить від інтенсивності використання. Навколишня температура, магнітні та електричні поля, атмосферний тиск, вологість повітря відносяться до зовнішніх умов, що призводять до виникнення похибок внаслідок їх зміни. Тому завжди похибки задаються для нормальних, чітко заданих умов вимірювання.

Якщо між вимірюваним явищем або властивістю і принципом дії засобу вимірювань немає теоретично доведеної залежності, це може стати причиною виникнення похибок методу вимірювання (теоретичних або методичних похибок). Похибки методу вимірювання є наслідком спрощень або припущень, застосування емпіричних формул і залежностей. Іншим джерелом методичної похибки є заміна вимірювання шуканої величини на іншу, яка є більш доступною і зв'язаною з шуканою величиною. Прикладом таких вимірювань є вимірювання тиску крові у судинах людини за допомогою вимірювання тиску у манжетці, що стискає судину.

Усунення джерел похибок до початку вимірювання. Цей спосіб слід вважати найбільш раціональним, бо він звільняє від необхідності усувати похибки в процесі вимірювання або обчислювати результат з урахуванням поправок. Так, для усунення температурної похибки необхідно забезпечити необхідну температуру навколишнього середовища з припустимими коливаннями, тобто організувати термостабілізація об'єкту та засобу вимірювання.

При вимірюванні за допомогою електронних вимірювальних пристроїв їх рекомендується прогрівати. Для усунення впливу на точність вимірювань зовнішніх магнітних і електричних полів використовуються різні екрани. Вплив шкідливих вібрацій на точність вимірювань може бути усунуто за рахунок використання різного роду амортизаторів. Вплив вологості та тиску на точність вимірювань може бути виключено, якщо для вимірювань використовувати, наприклад, спеціальні камери.

Для усунення систематичних похибок в процесі вимірювання існують різні способи і прийоми без використання спеціальних установок.

Спосіб введення поправок заснований на знанні систематичної похибки і закономірності її зміни. У цьому випадку в результат вимірювання, що містить систематичні похибки, вносять поправки, рівні цим похибкам, але з протилежним знаком.

Спосіб заміщення використовується при вимірюванні електричних параметрів - опору, ємності, індуктивності. Об'єкт вимірювання ставлять в ту чи іншу вимірювальну схему. Врівноважують коло (міст). Не змінюючи вимірювальної схеми, замінюють вимірюваний об'єкт, включаючи в коло міру змінного значення. Знову врівноважують коло. Визначають значення вимірюваної величини.

Спосіб компенсації похибки за знаком полягає в тому, що вимірювання проводять двічі так, щоб невідома за розміром похибка входила в результати з протилежними знаками. Наприклад, при зважуванні на рівноплечих вагах для виключення похибки від залишкової нерівноплечості при першому зважуванні невідому вагу P_x врівноважують еталонною вагою P_{e1} . Потім змінюють чашки ваг і ту ж вагу врівноважують еталонною вагою P_{e2} . Рівняння рівноваги для цих випадків мають вигляд

$$\begin{cases} P_{e1}l = P_x(l + \Delta l), \\ P_{e2}(l + \Delta l) = P_x l. \end{cases}$$

де l - довжина плеча ваги, Δl - похибка нерівноплечості. Поділивши перше рівняння на друге і вважаючи, що $\Delta l/l \ll 1$, одержимо

$$\Delta l/l \approx (P_{e1}/P_{e2} - 1)/2.$$

Як видно з одержаного виразу, висновок про рівноплечість ваг можна зробити, виходячи з рівності еталонних ваг. Далі, з першого рівняння визначаємо величину невідомої ваги

$$P_x = P_{e1} \left(1 + \frac{P_{e1}/P_{e2} - 1}{2} \right).$$

4.4 Випадкові похибки

Випадкові похибки представляють собою похибки, в появі кожної з яких не спостерігається якої-небудь закономірності. Випадкові похибки неминучі і непереборні і завжди присутні в результаті вимірювання. Вони викликають розсіювання результатів при багаторазовому і досить точному вимірюванні однієї і тієї ж величини при незмінних умовах.

Кожна випадкова похибка виникає в результаті впливу багатьох чинників, кожен з яких сам по собі не має значного впливу на результат. Так як випадкові похибки не піддаються вилученню з результатів вимірювань, то при розгляді їх впливу на результат вимірювань завдання зводиться до вивчення властивостей сукупностей результатів окремих спостережень.

Природа і фізична сутність випадкових і систематичних складових похибки вимірювань різна. Однак оцінки невилучених залишків систематичних похибок і випадкових похибок здійснюються на основі обробки статистичного матеріалу, що є сукупністю результатів вимірювань.

Для вивчення випадкових похибок використовуються методи теорії ймовірностей і математичної статистики. Ці методи придатні і для оцінки систематичних складових похибок.

4.4.1. Випадкові величини. Закони розподілу випадкових величин.

В теорії ймовірностей поряд з поняттям випадкової події і ймовірності одним з основних є поняття випадкової величини. Наприклад, час безвідмовної роботи деякого приладу, число появ герба при трьох підкиданнях монети і т.п.

Назвемо випадковою величину, пов'язану з даним дослідом, яка при кожному здійсненні дослідів може приймати те чи інше числове значення, залежно від випадку.

Між випадковими подіями і випадковими величинами існує тісний зв'язок.

Випадкова подія є якісною характеристикою випадкового результату дослідів, а випадкова величина – його кількісною характеристикою. Випадкові величини за своїм характером поділяються на дискретні і неперервні.

Дискретна випадкова величина - це така величина, яка може приймати лише розривні (дискретні, перервні) значення. Іншими словами, вона має таку властивість, що кожне з її можливих значень має окіл, який вже не містить жодного з інших значень цієї ж величини. Всі можливі значення дискретної випадкової величини можуть бути перенумеровані

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$$

Випадкова величина X називається неперервною, якщо сукупність її можливих значень цілком заповнює деякий проміжок числової осі, який може бути скінченним або нескінченним. Наприклад, випадкова величина X - час безвідмовної роботи приладу, - неперервна, оскільки її можливе значення $t > 0$

4.4.2. Закон розподілу випадкової величини.

Важливою характеристикою випадкової величини є розподіл ймовірностей цієї величини. Справа в тому, що випадкова величина може приймати ті чи інші числові значення, взагалі кажучи, із різними ймовірностями.

Приклад 1. При трьох підкиданнях монети випадкова величина X - число появ герба – може приймати значення $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 2, x_4 = 3$ із відповідними ймовірностями, які обчислимо за формулою Бернуллі

$$p_1 = P_3(0) = C_3^0 \left(\frac{1}{2}\right)^0 \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}, \quad p_2 = P_3(1) = C_3^1 \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{3}{8},$$
$$p_3 = P_3(2) = C_3^2 \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right) = \frac{3}{8}, \quad p_4 = P_3(3) = C_3^3 \left(\frac{1}{2}\right)^3 \left(\frac{1}{2}\right)^0 = \frac{1}{8}.$$

Співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і ймовірностями, з якими приймаються ці значення, називається законом розподілу ймовірностей випадкової величини.

Для дискретної випадкової величини X закон розподілу може бути заданий таблично або графічно. В першому випадку закон розподілу називається рядом розподілу ймовірностей випадкової величини X .

X	x_1	x_2	\dots	x_n
P	p_1	p_2	\dots	p_n

В першому рядку таблиці записують всі можливі значення випадкової величини в порядку зростання, а в другому - відповідні їм ймовірності. Оскільки події $\{X = x_1\}, \{X = x_2\}, \dots, \{X = x_n\}$ становлять повну групу несумісних подій, то за теоремою додавання ймовірностей маємо

$$\sum_{k=1}^n p_k = 1, \quad (4.1)$$

тобто сума ймовірностей всіх можливих значень випадкової величини дорівнює одиниці.

Графічне зображення закону розподілу називається багатокутником розподілу: по осі абсцис відкладаємо можливі значення x_k випадкової величини X , а по осі ординат – ймовірності p_k цих значень. Для розглянутого вище прикладу 1 ряд і багатокутник розподілу мають вигляд відповідно

X	0	1	2	3
P	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$

Закон розподілу неперервної випадкової величини може бути заданий графічно або аналітично $p_k = f(x_k)$ (з допомогою формули). Табличне задання неможливе, оскільки ймовірність отримати будь-яке певне значення неперервної величини дорівнює нулеві, що пов'язане не з неможливістю самої події (попадання в певну точку на числовій осі), а з безмежно великим числом можливих випадків.

Тому для неперервних випадкових величин (як, зрештою, і для дискретних) визначають ймовірність попадання в деякий інтервал числової осі.

Ймовірність попадання випадкової величини X в інтервал $[a, b]$ визначають як ймовірність події $\{a \leq X < b\}$ і позначають

$$P\{a \leq X < b\}, \quad (4.2)$$

(ліву межу інтервалу включають, а праву не включають).

Для кількісної оцінки закону розподілу випадкової величини (дискретної або неперервної) задають функцію розподілу ймовірностей випадкової величини, яку визначають як ймовірність того, що випадкова величина X прийме значення, менше деякого фіксованого числа x і позначають

$$F(x) = P\{X < x\} \quad (4.3)$$

або $F(x) = P\{-\infty < X < x\}$.

Функцію розподілу $F(x)$ інколи називають інтегральною функцією розподілу ймовірностей випадкової величини.

Знаючи функцію розподілу $F(x)$, можна обчислити ймовірність попадання випадкової величини в деякий інтервал $[a, b]$:

$$P\{a \leq X < b\} = F(b) - F(a). \quad (4.4)$$

Дійсно, випадкова подія $\{X < b\}$ є об'єднанням двох несумісних подій $\{X < a\}$ і $\{a \leq X < b\}$.

Отже, за теоремою додавання ймовірностей несумісних подій маємо

$$P\{X < b\} = P\{X < a\} + P\{a \leq X < b\},$$

звідки $P\{a \leq X < b\} = P\{X < b\} - P\{X < a\}$,

або, враховуючи позначення (3) $P\{a \leq X < b\} = F(b) - F(a)$.

Встановимо деякі властивості функції розподілу.

1. $F(x)$ є неспадною функцією, тобто $F(x_2) \geq F(x_1)$, якщо $x_1 < x_2$.
2. Значення функції розподілу належать відрізку $[0; 1]$, тобто $0 \leq F(x) \leq 1$.

Інакше: $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1.$

3. Функція розподілу неперервна зліва:

$$F(x) = F(x - 0), \quad \forall x.$$

Для прикладу 1 побудуємо функцію розподілу випадкової величини X , заданої рядом розподілу

X	0	1	2	3
P	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$

При $x < 0$ $F(x) = P\{X < 0\} = 0;$

при $0 \leq x < 1$ $F(x) = P\{X < 1\} = P\{X = 0\} = \frac{1}{8};$

при $1 \leq x < 2$ $F(x) = P\{X < 2\} = P\{X = 0\} + P\{X = 1\} = \frac{1}{8} + \frac{3}{8} = \frac{1}{2};$

при

$2 \leq x < 3$ $F(x) = P\{X < 3\} = P\{X = 0\} + P\{X = 1\} + P\{X = 2\} = \frac{1}{8} + \frac{3}{8} + \frac{3}{8} = \frac{7}{8};$

при $x \geq 3$ $F(x) = P\{X \geq 3\} = 1.$

Приклад 2. Нехай функція розподілу деякої неперервної випадкової величини X задана у вигляді

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ a(1 - \cos x), & 0 < x \leq \pi \\ 1, & x > \pi \end{cases}.$$

Визначити значення коефіцієнта a і побудувати графік функції.

Оскільки функція неперервна зліва, то при $x = \pi$ маємо $a(1 - \cos \pi) = 1$,
звідки $a = \frac{1}{2}$.

Закон розподілу ймовірностей неперервних випадкових величин може бути заданий також і щільністю розподілу.

Нехай неперервна випадкова величина X задана функцією розподілу $F(x)$, неперервною і диференційовною. Ймовірність попадання цієї випадкової величини в деякий інтервал $(x, x + \Delta x)$ знайдемо на підставі співвідношення (4):

$$P\{x < X < x + \Delta x\} = F(x + \Delta x) - F(x),$$

тобто як приріст функції розподілу на цьому інтервалі.

$$P\{x < X < x + \Delta x\}$$

Відношення $\frac{\quad}{\Delta x}$ виражає середню ймовірність, яка приходить на одиницю довжини інтервалу.

Перейшовши до границі при $\Delta x \rightarrow 0$, отримаємо

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = F'(x)$$

Функція $f(x) = F'(x)$ (4.5)

називається щільністю розподілу неперервної випадкової величини X , а її графік – кривою розподілу. Іноді вживають термін – диференціальна функція розподілу. З означення (4.5) випливає, що

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \tag{4.6}$$

Використавши формули (4) і (6), виразимо ймовірність попадання випадкової величини в заданий інтервал через щільність розподілу

$$P\{a \leq X < b\} = \int_a^b f(x)dx \tag{4.7}$$

$$P\{a \leq X < b\} = F(b) - F(a) = \int_{-\infty}^b f(x)dx - \int_{-\infty}^a f(x)dx = \int_a^b f(x)dx$$

Дійсно, .

Встановимо деякі властивості щільності розподілу:

1. $f(x)$ є невід'ємною функцією, тобто $f(x) \geq 0$.

Дійсно, оскільки $F(x)$ неспадна функція, то $F'(x) = f(x) \geq 0$.

2. $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$.

Це випливає із формули (4.6) і властивості 2 для функції розподілу $F(x)$

Геометричне тлумачення щільності розподілу випливає із формули (7): ймовірність попадання випадкової величини X обчислюється як площа криволінійної трапеції, обмеженої зверху графіком кривої $f(x)$, знизу – відрізком $[a, b]$ осі абсцис, зліва і справа - відрізками прямих $x = a$, $x = b$.

Властивість 2 геометрично означає, що вся площа, обмежена кривою розподілу і віссю абсцис, дорівнює одиниці.

4.5 ГРУБІ ПОХИБКИ І ПРОМАХИ

Джерелами промахів нерідко бувають помилки, допущені оператором під час вимірювань. Найбільш характерними з них є: неправильний відлік за шкалою вимірювального пристрою, неправильна запис результату спостереження (описка), помилки при діях з приладами, якщо вони повторюються в процесі вимірювань.

Причинами грубих похибок можуть бути раптові або короткочасні зміни умов вимірювання або непомічені несправності в апаратурі.

Оцінка наявності грубих похибок вирішується методами математичної статистики - статистичною перевіркою гіпотез. Суть методу зводиться до наступного. Висувається нульова гіпотеза щодо результату вимірювання, який викликає деякий сумнів і розглядається як грубий промах у зв'язку з великим відхиленням від інших результатів вимірювання. При цьому нульова гіпотеза полягає в твердженні, що "сумнівний" результат насправді належить до можливої сукупності отриманих в даних умовах результатів вимірювань, і отримання такого результату ймовірно. Користуючись певними статистичними критеріями, намагаються спростувати нульову гіпотезу, тобто намагаються довести її практичну неймовірність. Якщо це вдається, то промах виключають, якщо ні - то результат вимірювання залишають. Вибір того чи іншого критерію заснований на принципі практичної впевненості. Для цього задаються досить малою ймовірністю того, що сумнівний результат дійсно міг би мати місце. Ймовірність називається рівнем значущості і зазвичай вибирається з ряду: 0,10; 0,05; 0,01 і т. д. Для даної ймовірності визначають критичну область значень критерію перевірки нульової гіпотези. Якщо значення критерію потрапляє в цю область, то гіпотеза відкидається.

Статистичні критерії дозволяють зробити висновок про наявність чи відсутність систематичної складової в результатах вимірювань. Для визначення закономірності зміни систематичної складової похибки можна використовувати метод найменших квадратів. Найбільш наочним методом виявлення систематичної похибки є графічний метод. Суть методу зводиться до наступного. На графік в координатах «результат вимірювання», «порядковий номер вимірювання» наносяться отримані результати вимірювань. Для наочності отримані точки з'єднують прямими лініями. За розташуванням точок на графіку судять про наявність систематичної похибки. Якщо тенденція у зміні результатів спостерігається, то систематична похибка існує і її слід виключити. В іншому випадку констатують, що систематична похибка відсутня (або несуттєва).

4.6 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ:

1. Що таке похибка?
2. Які види похибок ви знаєте?
3. Що таке систематична похибка?
4. Що таке випадкова похибка?

5 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОЦІНКА ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

5.1 ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТУ ОДНОКРАТНИХ ВИМІРІВ

Виміри шляхом однократних спостережень виконуються на виробництві в більшості випадків [5]. Застосування однократних вимірів можливо в наступних випадках:

а) Випадковими погрішностями можна зневажити, тобто вони є недостатньо малими в порівнянні з невиключеними систематичними. Це відбувається при виконанні умови

$$\frac{\Theta}{S(\tilde{A})} > 8, \quad (5.1)$$

де Θ - границя невиключених систематичних погрішностей результату виміру, $S(\tilde{A})$ - середнє квадратичне відхилення випадкових погрішностей результату виміру.

б) При наявності виробничої необхідності, викликаній руйнуванням зразків, неможливістю повторення вимірів, економічною доцільністю, низкою точністю вимірів, що допускається, і т.д.

До початку вимірів проводять апріорну оцінку погрішності результату виміру (A). Для цього на підставі попередніх даних про вимірювану величину, умови виміру і складових приватних погрішностей, а також паспортних даних про погрішності ЗВ і методик виконання вимірів визначають границю НСП (P) і границю (чи СКО) випадкової погрішності (P) при одній і тій же довірчій імовірності P . У залежності від їх відносної величини (див. вище) погрішність A приймається рівною Θ чи ε . Якщо апріорна оцінка перевищує погрішність результату, що допускається, вимірів, то вибирають більш точне ЗВ чи змінюють методику виконання вимірів, якщо не перевищує, то вона входить у результат виміру, як характеристика його точності.

Одержання результату при виконанні однократних вимірів виконують у наступній послідовності:

1) Знімають відлік з відлікового пристрою приладу. На підставі відліку визначають показання приладу Q - значення вимірюваної величини - за ціною ділення чи по постійній шкалі приладу. Для контролю може виконуватися два - чотири виміри, однак вони не обробляються спільно статистично, як у випадку багаторазових спостережень.

2) Визначають виправлене значення $Q_{\text{випр}}$ шляхом уведення систематичного виправлення. Для адитивного виправлення

$$Q_{\text{випр}} = Q + \delta_{\text{сист.}} \quad (5.2)$$

3) На підставі попередньо заданої (чи визначеної) погрішності виміру визначають інтервал, у якому з імовірністю P знаходиться значення вимірюваної величини - результат виміру:

$$Q_{\text{випр}} - \Delta \leq Rez \leq Q_{\text{випр}} + \Delta, P \quad \text{або} \quad Rez = Q_{\text{випр}} \pm \Delta, P \quad (5.3)$$

Такий запис показує, що вимірювана величина може мати в дійсності будь-яке значення, нам невідоме, у межах даного інтервалу. Іншими словами, усі значення усередині інтервалу є рівновірогідними.

5.2 ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРІВ З БАГАТОРАЗОВИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ

Виміри з числом спостережень n більше 4 умовно відносять до вимірів з багаторазовими спостереженнями. Вони проводяться при підвищених вимогах до точності вимірів при виконанні науково-дослідних чи метрологічних робіт.

Порядок і методика виконання прямих вимірів з багаторазовими незалежними спостереженнями, обробки результатів спостережень і оцінки їх погрішностей регламентовані в ДСТ 8.207-76. Дані, отримані при спостереженнях, обробляють з використанням методів математичної статистики. Результат виміру одержують шляхом виконання наступних операцій:

- 1) Виконують серію вимірів і одержують результати спостережень.
- 2) Виключають відомі систематичні погрішності з результатів спостережень.
- 3) Визначають середнє арифметичне виправлених результатів спостережень, прийнятого за результат вимірів, виконують оцінку середньоквадратичного відхилення результату вимірів $S(A)$.
- 4) Перевіряють гіпотезу про приналежність результатів спостережень нормальному закону розподілу, і при її виконанні обчислюють довірчі границі випадкової складової погрішності виміру

$$\varepsilon = t_s S(A), \quad (5.3)$$

де t_s - коефіцієнт Стюдента, що вибирається в залежності від довірчої імовірності P і числа результатів спостережень n .

- 5) Обчислюють довірчі границі не виключених систематичних погрішностей Θ і визначають погрішність виміру Δ у залежності від значення $\Theta/S(A)$. Результат виміру представляється в стандартній формі з включенням погрішності Δ .

5.3 . ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТУ НЕПРЯМИХ ВИМІРІВ

При виконанні непрямих вимірів шукане значення знаходять по відомій залежності між цією величиною і величинами, обумовленими в ході прямих вимірів:

$$x = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (5.4)$$

Результат виміру визначають шляхом підстановки в цю формулу результатів виміру аргументів, отриманих прямими багаторазовими чи однократними спостереженнями:

$$\tilde{A} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_k). \quad (5.5)$$

Основне утруднення складається у визначенні середньоквадратичного відхилення випадкової погрішності вимірюваної величини, оскільки загальні математичні операції одержання закону розподілу функції за законами розподілу аргументів відсутні. Тому користаються двома наближеними методами:

1) Шляхом лінеаризації функціональної залежності розкладанням у ряд Тейлора і затриманням перших членів розкладання, тоді

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{A}_i} \right)^2 \cdot S^2(\tilde{A}_i)}. \quad (5.6)$$

2) При наявності взаємозалежності між аргументами використовують метод приведень. Відповідно до цього методу одержують ряд окремих значень вимірюваної величини шляхом підстановки значень аргументів у формулу, що виражає залежність непрямо вимірюваної величини від аргументів. Потім цей ряд обробляють як сукупність результатів багаторазових прямих спостережень.

Для визначення границь НСП використовують композицію НСП аргументів. При перебуванні погрішності вимірів Δ надходять аналогічно прямим вимірам. Основні положення виконання непрямих вимірів і оцінювання їх погрішностей регламентовані методичними вказівками РД 50-555-85 за умови, що аргументи є постійними ФВ, а НСП розподілені рівномірно усередині заданих границь $\pm\Theta$.

5.4 . РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРУ

Незалежно від виду виконуваних вимірів (прямі, непрямі, однократні чи багаторазові) результат виміру повинний бути представлений у стандартній формі, що регламентується МІ 1317-86, із вказівкою показників точності вимірів, що оцінюються погрішністю вимірів. Разом з результатом вимірів,

при необхідності, наводяться додаткові дані, умови вимірів і фізична модель об'єкта вимірів. Результат виміру може супроводжуватися указівкою відповідності характеристик погрішності нормам точності вимірів, якщо вони задані.

Представлення результатів вимірів, отриманих як середнє арифметичне результатів багаторазових спостережень, повинне супроводжуватися вказівкою числа спостережень і інтервалом часу, протягом якого вони проведені. Допускається давати посилання на документ, що містить методику вимірів, у якій приводяться ці дані.

Використовують наступні основні форми представлення результату вимірів:

1) При симетричній довірчій погрішності:

$$\tilde{A} \pm \Delta, P, \quad (5.7)$$

де \tilde{A} - результат виміру;

Δ - границя погрішності, у якій з імовірністю P знаходиться істинне значення величини A . Звичайно для P приймаються значення 0,95 і 0,99.

2) При відсутності даних про вид функції розподілу складових погрішності результату і необхідності подальшої обробки результатів і аналізу погрішностей:

$$\tilde{A}; S(\tilde{A}); n; \Theta. \quad (5.8)$$

5.5 ПИТАННЯ САМОПЕРЕВІРКИ:

1. Які вимірювання називаються однократними?
2. Які вимірювання називаються багатократними?
3. Які є форми представлення результату вимірювань?
4. Які є форми представлення результату вимірювань?

6 ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛАХ

6.1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КІЛ (ЕМК).

Основне поняття у галузі електрики – це електричний заряд q , тобто кількість електрики, що накопичено тілом [6]. Кількісно величини зарядів оцінюються силою взаємодії між зарядженими тілами. Взаємодія заряджених тіл відбувається за допомогою електричного поля, яке визначається вектором напруженості електричного поля E – це сила, що діє на одиничний заряд, розміщений у точці простору, де діє електричне поле. Одиниця виміру заряду – 1 Кулон. Одиниця виміру напруженості поля – 1 Вольт/м.

Спрямований рух зарядів у провіднику називають електричним струмом провідності. Можливий також рух зарядів у діелектрику, пов'язаний із зміною зовнішнього електричного поля у часі. Такий рух називають струмом зміщення. Він має місце під час поляризації діелектричних матеріалів. Мірою струму є сила струму i , що визначається кількістю електричного заряду Δq , перенесеного через переріз провідника за одиницю часу Δt . Миттєве значення струму визначається виразом:

$$i = \Delta q / \Delta t. \quad (6.1)$$

Одиниця виміру струму $1 \text{ A} = 1 \text{ Кл/с}$.

Із струмом пов'язане магнітне поле H , що проявляється у силевій взаємодії провідників із струмом. Напруженість магнітного поля вимірюється у А/м, тобто це сила взаємодії двох провідників зі струмом 1 А, що знаходяться на відстані 1 м.

Для перенесення заряду Δq через ділянку провідника необхідно витратити енергію Δw . Відношення цієї енергії до величини заряду, що переноситься, називається напругою, прикладеною до ділянки кола

$$u = \Delta w / \Delta q \quad (6.2)$$

Одиниця виміру напруги $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Енергія Δw , витрачена на ділянці кола зазнає таких змін:

- перетворюється у інший вид енергії, наприклад, у тепло;
- накопичується у електричному та магнітному полях елементів кола.

Миттєве значення швидкості зміни енергії, що потрапляє у коло, називається миттєвою потужністю

$$p = \Delta w / \Delta t. \quad (6.3)$$

Підставляючи вирази (6.1) і (6.2) у (6.3), одержимо

$$p = ui. \quad (6.4)$$

Одиниця виміру потужності $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

У залежності від напрямку протікання струму величини струму і напруги можуть приймати як додатні, так і від'ємні значення. Історично склалося, що додатнім напрямом струму вважається напрям руху позитивних зарядів, тобто напрям, що є протилежним реальному руху електронів – від'ємно заряджених частинок. Додатний напрям струму позначають стрілкою на провіднику. За додатній напрям напруги ми приймемо напрям, що співпадає з напрямом струму у джерелах енергії і протилежним – у споживачах енергії. Відповідно, потужність буде додатною у джерелах, які її віддають, і від'ємною у споживачах, які її перетворюють або накопичують.

6.2 ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КІЛ, ЇХ ВЛАСТИВОСТІ ТА МОДЕЛІ

Вивчення властивостей фізичних систем, зводиться до встановлення кількісних співвідношень між фізичними величинами, які описують стан системи (у випадку ЕМК – це струми, напруги, потужності тощо).

Оскільки реальна фізична система є нескінченно складною, будь-яка наукова теорія вивчає матеріальні системи за допомогою математичних моделей, які із усієї різноманітності властивостей реального об'єкту виділяють найхарактерніші, які найбільшим чином впливають на поведінку об'єкту у конкретних умовах. Докладність (і, відповідно, складність) моделі залежить від змісту конкретного завдання, необхідної точності передбачення і наявних вимірювальних та розрахункових можливостей розробника системи. Застосовуючи такий підхід, одержують теоретичну модель системи, що складається з ідеальних елементів.

Теоретичні моделі ЕМК називають схемами заміщення, які будуються з ідеальних схемних елементів. Схеми заміщення зображають у вигляді певних з'єднань схемних елементів, що мають умовні графічні зображення. В залежності від схеми з'єднань модель набуває тих, чи інших властивостей, які описуються модельними рівняннями, тобто, у випадку ЕМК, співвідношеннями між струмами і напругами у різних частинах схеми заміщення. Заміна реальних кіл їх схемами заміщення усуває другорядні деталі і концентрує увагу на головних процесах у пристрої.

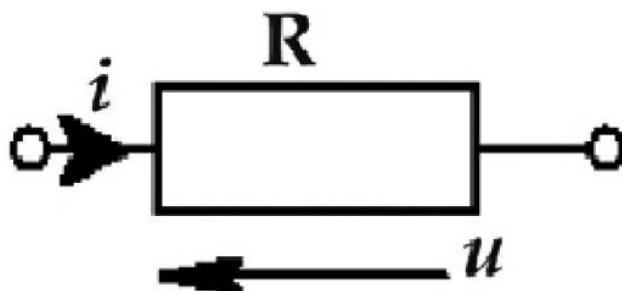


Рис. 6.1. Електрична схема опору

АКТИВНИЙ ОПІР – це пасивний елемент кола, у якому електромагнітна енергія не накопичується, а незворотно перетворюється у інші види енергії (теплову, випромінювання, механічну, хімічну). Такий елемент є ідеальною моделлю і позначається на схемах, як подано на Рис.6.1. Співвідношення між струмом і напругою у активному опорі визначається законом Ома

$$i = u / R, \quad (6.5)$$

де R – величина опору ділянки кола. Одиниця вимірювання опору $1 \text{ Ом} = 1\text{В/А}$.

Величина, обернена до опору, називається провідністю

$$g = 1 / R = i / u. \quad (6.6)$$

Одиниця вимірювання провідності $1\text{Сим} = 1\text{А/В}$.

Вирази (6.5) та (6.6) описують вольт-амперну характеристику опору (ВАХ), де R або g є крутістю нахилу прямої, яка і є ВАХ лінійного елемента. Підставивши вираз (5) у (4), одержимо

$$R = p / i^2 = u^2 / p, \quad (6.7)$$

тобто, опір R є також параметром, який для даних струму або напруги визначає споживання енергії на ділянці кола.

Реальним елементом ЕМК, що за своїми властивостями наближається до моделі активного опору, є резистор.

ІНДУКТИВНІСТЬ – це модель елемента кола, що накопичує магнітну енергію. Властивості індуктивності визначаються вебер-амперною характеристикою:

$$\Psi = Li, \quad (6.8)$$

де Ψ - магнітне потокозчеплення, вимірюване у веберах (Вб), L – індуктивність, що вимірюється у генрі (Гн). За законом електромагнітної індукції:

$$u = d\Psi / dt, \quad (6.9)$$

звідки одержимо співвідношення між струмом і напругою у індуктивності

$$u = L \frac{di}{dt}, \quad (6.10)$$

$$i = \frac{1}{L} \int u dt. \quad (6.11)$$

Співвідношення виду (6.5), (6.10), (6.11) називаються елементними рівняннями. Рівняння (6.10), (6.11) є ідеальною моделлю накопичувача магнітної енергії в колі, вигляд якого на схемах заміщення подано на Рис. 6.2.



Рис. 6.2. Електрична схема індуктивності

Енергія, що накопичується у магнітному полі індуктивності, дорівнює

$$w_L = L \int_0^i i_l di_l = \frac{Li^2}{2}. \quad (6.12)$$

Миттєва потужність має зміст швидкості зміни накопиченої у магнітному полі енергії

$$p_l = dw_l / dt = Li \frac{di}{dt}. \quad (6.13)$$

Знак миттєвої потужності залежить від напрямку надходження енергії – від джерела до індуктивності, або – навпаки. Ця властивість накопичувати енергію і далі віддавати її джерелу або іншому колу характерна для реактивних елементів кола. Важливо зазначити, що співвідношення між струмом і напругою у реактивному елементі мають інтегро-диференційний характер, на відміну від алгебраїчного рівняння для активного елемента.

Реальним елементом кола, близьким за властивостями до індуктивності є котушка індуктивності.

ЄМНІСТЬ – це модель елемента кола, який накопичує енергію електричного поля. Властивості елемента визначаються кулон-вольтовою характеристикою

$$q = Cu_c, \quad (6.14)$$

де C – коефіцієнт, який пов'язує заряд, накопичений елементом, з напругою, яка діє на ньому.

Одиниця вимірювання ємності 1 фарада=1Кл/В. Конструктивно ємність виконується у вигляді двох провідників, розділених шаром діелектрика. Тому струму провідності у ємності немає. Елементні рівняння у разі ємності мають вигляд:

$$i = dq / dt = C du_c / dt, \quad (6.15)$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt, \quad (6.16)$$

тобто струм у ємності є струмом зміщення у шарі діелектрика і залежить від швидкості зміни діючої напруги. Рівняння (6.15), (6.16) є ідеальною моделлю накопичувача електричної енергії в колі, вигляд якого на схемах заміщення подано на Рис. 6.3. Ємність, як і індуктивність, теж є реактивним елементом і зв'язок між струмом і напругою є інтегродиференціальним.



Рис. 6.3. Електрична схема ємності

Енергія, що накопичується у електричному полі ємності

$$w_c = C \int_0^{u_c} u du = C u_c^2 / 2. \quad (6.17)$$

Миттєва потужність $p_c = dw_c / dt = u_c i = C u_c du_c / dt$ (6.18)

може бути додатною або від'ємною в залежності від напрямку надходження енергії – від джерела, або до нього.

Реальний елемент, що наближається до моделі ємності зветься електричним конденсатором.

ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ. Будь-яке ЕМК має хоча б один активний елемент – джерело (генератор) (Рис.6.4), що є перетворювачем якогось іншого виду енергії в електричну.

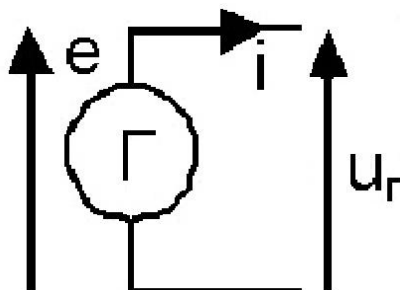


Рис. 6.4. Електрична схема джерела енергії

Яким би не був принцип дії генератора, найважливішим його параметром як елемента кола є електрорушійна сила (ЕРС)

$$e = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w_c}{\Delta q}, \quad (6.19)$$

де Δw_c - робота, яку виконують зовнішні сили, що переносять заряд Δq вздовж замкненого кола. ЕРС генератора дорівнює напрузі, що діє на його розімкнених полюсах. Такий режим роботи генератора називається режимом холостого ходу (х.х.), тобто

$$e = U_{xx}. \quad (6.20)$$

У загальному випадку ЕРС є функцією часу і їй приписується напрям, що співпадає з напрямом струму у генераторі. Миттєва потужність, яку віддає генератор у коло

$$p_r = u_r i, \quad (6.21)$$

де u_r – напруга на полюсах генератора під час протікання через нього струму i .

Миттєва потужність може бути додатною або від'ємною в залежності від напрямку потоку енергії від генератора або до нього. Так само, як для пасивних елементів, зручно ввести ідеалізовані моделі джерел.

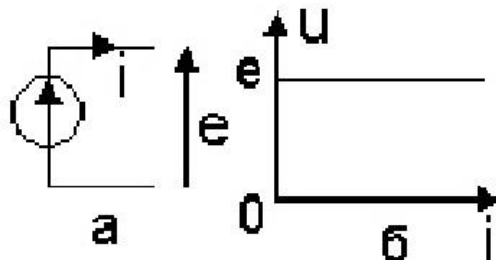


Рис. 6.5. Ідеалізоване джерело напруги

Ідеалізованим генератором напруги називається джерело енергії, величина напруги на полюсах якого не залежить від величини струму, що проходить через нього. За будь-якої величини струму

$$u_r = u_{xx} = e. \quad (6.22)$$

На Рис. 6.5,а подано умовне зображення джерела напруги на електричних схемах, а на Рис. 6.5,б – його вольт-амперна (або зовнішня) характеристика. Джерело напруги має нескінченно велику потужність $p_r = ei \rightarrow \infty$, коли $i \rightarrow \infty$, що говорить про те, що така модель є ідеальною.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ.

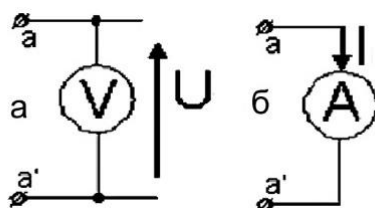


Рис. 6.6. Електричні схеми вимірювальних елементів НМК

Метою аналізу ЕМК є одержання величин струмів і напруг у елементах ЕМК. Для вимірювання цих величин використовуються вольтметри та амперметри. Це перетворювально-вимірювальні пристрої, що перетворюють електромагнітну енергію, яка існує у елементах кола, у відлік того чи іншого виду, пропорційний величині струму чи напрузі у місці підімкнення вимірювального елемента. На Рис. 6.6,а подано умовне зображення вольтметра, а на Рис.6.6,б – амперметра на електричних схемах. Крім вимог до точності вимірювання, обговорених у 1 розділі, існує вимога щодо впливу параметрів вимірювальних пристроїв на величину виміру. Цю вимогу можна сформулювати таким чином: зміна величини відліку струму або напруги у колі під час підімкнення вимірювальних пристроїв повинна складати певну малу частину похибки вимірювання, що виникають за рахунок інших чинників. Така зміна буде відсутня за умови використання ідеальних вольтметра та амперметра. Умови ідеальності мають вигляд: $R_V \rightarrow \infty$, $R_A \rightarrow 0$.

6.3 ОПИС ТА КЛАСИФІКАЦІЯ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ У ЕМК

Електричною схемою ЕМК називається графічне зображення його моделі, складене з ідеалізованих пасивних (R, L, C) та активних (e, i) елементів, з'єднаних між собою. Кожний схемний елемент (і його параметр) має своє умовне позначення й розмірність, які використовуються для складання електричних схем кола. З'єднання елементів у схемі відбувається за допомогою провідників із нульовим опором, незалежно від їх довжини на кресленні схеми. Приклад електричної схеми подано на Рис. 6.7.

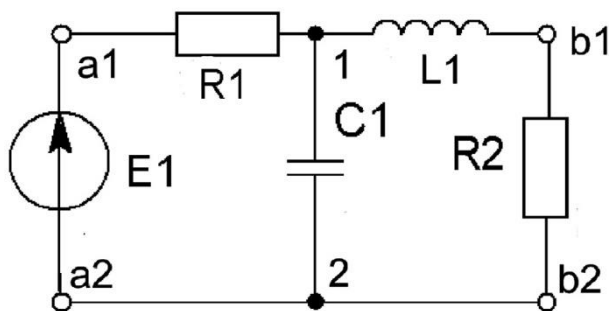


Рис. 6.7. Електрична схема ЕМК

Для опису структури схеми користуються такими поняттями:

- гілка – частина схеми, у якій протікає той самий струм. Відповідно, елементи у тій самій гілці з'єднані послідовно, тобто послідовним називається з'єднання елементів, по яких протікає той самий струм. Гілка може складатися з одного елемента. Приклади гілок: E1-R1, L1-R2; C1. Відповідно, вольтметр під'єднується до гілки паралельно, а амперметр – послідовно з гілкою;

- вузол – місце з'єднання більше двох гілок. Гілки, які підімкнено до двох однойменних вузлів ввімкнені паралельно, тобто паралельним називається з'єднання гілок, на яких діє та сама напруга. Приклади вузлів: 1, 2;
- двополюсник – частина схеми, що вмикається за допомогою двох (пари) вузлів (полюсів). Приклад двополюсника: a1-a2, 1-2, b1-b2;
- багатополіусник – схема, що має кілька пар полюсів для ввімкнення інших схем. Найчастіше використовують чотириполюсник (двобрамник, two ports). Приклад чотири-полюсника: a1-a2, b1-b2;
- навантаження – елемент схеми, на якому виділяється корисна потужність (R2 на Рис. 12. 2);
- вхід – пара полюсів для ввімкнення джерела (a1-a2 на Рис. 12. 2);
- вихід – пара полюсів для ввімкнення навантаження (b1-b2 на Рис. 12. 2);
- контур – сукупність гілок, по яких можна провести замкнену лінію, яка не перетинається. Приклади контурів: E1-R1-C1, E1-R1-L1-R2, C1-L1-R2;
- підсхема - частина схеми, яка кількома полюсами ввімкнена у неї.

6.4 ОСНОВНІ ЗАКОНИ, ЩО ПОВ'ЯЗУЮТЬ СТРУМИ І НАПРУГИ У ЕМК.

1-й закон Кірхгофа.

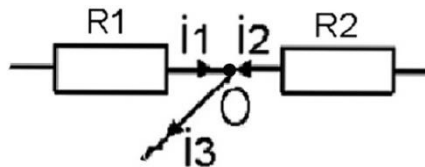


Рис. 6.8. Струми у вузлі ЕМК

Розглянемо коло (Рис. 6.8), що містить вузол O. Приплив струмів i_1 та i_2 до вузла означає пересування зарядів до цього вузла. Заряди у вузлі не можуть накопичуватись, бо він не є фізичним тілом. Тому, у будь-яку мить заряди повинні відтікати від вузла у тій же кількості, як вони припливають до нього.

Таким чином $\sum_{k=1}^n q_k = 0$, де зарядам, спрямованим до вузла та від нього, надані протилежні знаки. Диференціюємо цей вираз за часом t , враховуючи, що $i = dq / dt$, одержимо вираз 1-го закону Кірхгофа або закону Кірхгофа для струмів (ЗКС)

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0. \quad (6.23)$$

Словесне формулювання закону має різні форми. Одне з них: алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю. (Не забуваючи про протилежні знаки струмів, що прямують до вузла і від нього). Закон має силу для будь-якого вузла.

Виходячи з цього, для кола з N вузлами можна скласти $N-1$ незалежних рівнянь виду (6.23).

2-й закон Кірхгофа.

Розглянемо заряд dq , що переміщується замкненим контуром на Рис. 6.9. Розіб'ємо контур на ділянки з напругами u_1, u_2, \dots, u_n , серед яких можуть бути і напруги джерел. Якщо напрямок переміщення заряду збігається з напрямком напруги u_i , то заряд одержує енергію Δqu_i . Якщо ж ці напрямки протилежні, заряд віддає енергію, що або перетворюється у активному елементі, або накопичується у реактивному елементі. Оскільки енергія, одержана зарядом від джерел повністю віддається пасивним елементам, то, виходячи із закону збереження енергії, маємо

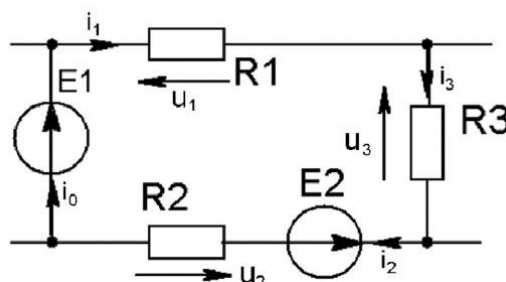


Рис. 6.9. Розподіл напруг у замкненому контурі

$$\sum_{k=1}^n dq u_k = 0, \quad \text{або} \quad \sum_{k=1}^n u_k = 0. \quad (6.24)$$

Причому сума містить в собі як напруги джерел, так і напруги на пасивних елементах. Рівняння (6.24) описує 2-й закон Кірхгофа, або закон Кірхгофа для напруг (ЗКН). Словесне формулювання має вигляд: для будь-якого замкненого контуру алгебраїчна сума миттєвих значень напруг на його окремих ділянках дорівнює нулю, причому напруги, що співпадають з довільно обраним напрямком обходу контуру і протилежні до цього напрямку, беруться з протилежними знаками. Закон діє і на ділянці кола, тобто $u_{ad} = u_{ab} + u_{bc} + u_{cd}$, враховуючи знаки напруг на елементах. Дивлячись на наведену на Рис. 6.9 схему, можна дати інше формулювання ЗКН:

$$\sum_{i=1}^n u_i = \sum_{j=1}^m e_j, \quad (6.25)$$

тобто, сума миттєвих значень напруг на пасивних елементах контуру дорівнює сумі миттєвих значень ЕРС, що діють у цьому контурі. Підсумовування в обох частинах рівняння (6.25) треба виконувати алгебраїчно, відповідно до того, співпадають чи протилежні напрямки напруг і ЕРС з напрямком обходу контуру.

Обидва закони Кірхгофа є наслідками закону збереження енергії, який для ЕМК може бути сформульований таким чином:

$$\sum_{i=1}^n u_i i_i = \sum_{j=1}^m e_j i_j, \quad (6.26)$$

тобто сума миттєвих потужностей на всіх пасивних елементах кола у будь-яку мить дорівнює сумі миттєвих потужностей, що віддаються джерелами струмів і напруг.

Таким чином, для розрахунку значень струмів у колі необхідно скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа, причому кількість рівнянь повинна дорівнювати кількості невідомих струмів. Далі за законом Ома визначаються напруги на елементах. Рівняння (6.26) називається балансом потужностей і може використовуватись для перевірки розв'язків системи рівнянь.

6.5 ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

З метою спрощення розрахунків режимів ЕМК, тобто визначення струмів, напруг і потужностей на елементах кола, можна виконати перетворення схеми кола, тобто замінити вихідну схему іншою, що має меншу кількість вузлів та контурів і, відповідно, описується меншою кількістю рівнянь.

Перетворення схеми називається еквівалентним, якщо у новій схемі залишаються незмінними напруги між вузлами та струми у вузлах, до яких підімкнена схема, що перетворюється. Розглянемо еквівалентні перетворення у схемах пасивних кіл.

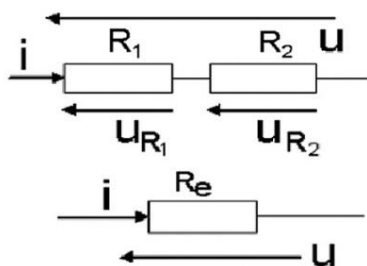


Рис. 6.10. Еквівалентне перетворення послідовно з'єднаних елементів кола

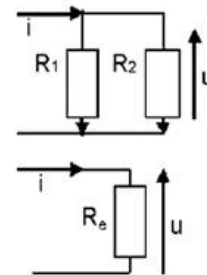


Рис. 6.11. Еквівалентне перетворення паралельно з'єднаних елементів кола

Послідовне з'єднання двох активних опорів подано на Рис. 6.10 За 2-м законом Кірхгофа для ділянки кола та, виходячи з визначення послідовного з'єднання,

$$u = u_{R_1} + u_{R_2} = iR_1 + iR_2 = i(R_1 + R_2).$$

З іншого боку $u = iR_e$. Таким чином

$$R_e = R_1 + R_2. \quad (6.27)$$

Паралельне з'єднання двох активних опорів подано на Рис. 6.11.

За 1-м законом Кірхгофа $i = i_1 + i_2$,

за законом Ома $i_1 = u / R_1 = uG_1$, $i_2 = u / R_2 = uG_2$,

тоді $i = uG_1 + uG_2 = u(G_1 + G_2)$.

З іншого боку $i = u / R_e = uG_e$. Таким чином

$$G_e = G_1 + G_2, \text{ та } R_e = 1 / G_e = \frac{1}{1 / R_1 + 1 / R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.28)$$

Скориставшись наведеними еквівалентними перетвореннями, можна, наприклад, визначити вхідний струм кола (див. Рис. 6.12):

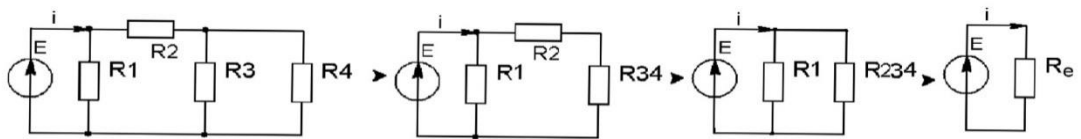


Рис. 6.12. Еквівалентні перетворення схеми ЕМК

$$R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}; \quad R_{234} = R_2 + R_{34}; \quad R_e = \frac{R_{234} R_1}{R_{234} + R_1}; \quad i = \frac{E}{R_e}.$$

6.6 ЕКВІВАЛЕНТНІ СХЕМИ РЕАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕМК

Реальні елементи ЕМК, у тій чи іншій мірі, мають властивості всіх розглянутих моделей, але одна з властивостей є переважною, тому реальні резистори мають паразитні індуктивність та ємність, реальні конденсатори мають активні втрати та індуктивність виводів, а реальні індуктивності мають активний опір провідників та міжвиткові ємності. Місця підімкнення елементів до ЕМК називаються затискачами (полюсами). Вилучити ідеальний елемент з реального і підімкнутися до нього безпосередньо неможливо – доступними є тільки зовнішні полюси елемента, до яких підімкнено усі елементи, що враховують реальну властивість того чи іншого компонента кола.

Реальні джерела (генератори) відрізняються від ідеальних моделей тим, що вони мають скінченну потужність, внаслідок чого напруга або струм на їхніх полюсах залежить від параметрів кіл, підімкнених до джерел. Залежність між напругою на полюсах генератора та струмом крізь нього називається зовнішньою або навантажувальною характеристикою генератора і може представлятись функцією $U(i)$ або $i(U)$. Вид цих функцій залежить від принципу дії конкретного джерела. У першому наближенні навантажувальні

характеристики можна представляти у вигляді прямих ліній (див Рис.6.13), тобто вважати реальне джерело лінійним елементом кола.

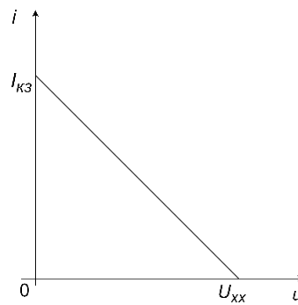


Рис. 6.13 Навантажувальна характеристика реального джерела енергії

Для розрахунків зручно представити реальний генератор еквівалентною схемою, що складається з ідеалізованих елементів, у якій співвідношення між струмом і напругою відповідало б обраній моделі (як показано на Рис.6.13).

Рівняння прямої, поданої на Рис.6.13, ліворуч, можна записати у вигляді

$$U = U_{xx} - R_i I, \quad (6.29)$$

де $R_i = U_{xx} / I_{kз}$ - внутрішній опір генератора, який можна визначити, виконавши два досліди, подані на Рис.6.14. - холостого ходу (х.х.) та короткого замкнення (к.з.). Дослід холостого ходу полягає у підімкненні

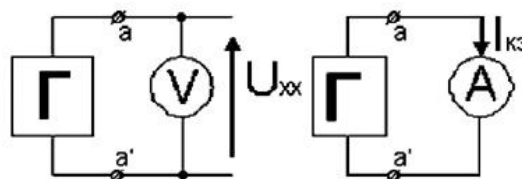


Рис. 6.14. Дослідження холостого ходу та короткого замкнення

«ідеального» вольтметра до полюсів генератора і вимірюванні напруги між цими полюсами. Дослід короткого замкнення полягає у підімкненні «ідеального» амперметра до полюсів генератора і вимірюванні струму короткого замкнення генератора. Дослід к.з. є уявним, бо не всяке реальне джерело витримує коротке замкнення його полюсів.

З рівняння (6.29) маємо $U_{xx} = E = U + R_i I$. Для схеми, наведеної на Рис. 6.15 U має сенс напруги на опорі навантаження R .

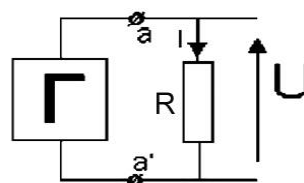


Рис. 6.15. Джерело з навантаженням

Відповідно,

$$E = IR_i + IR, \quad \text{або} \quad E - IR_i = IR. \quad (6.30)$$

Рівняння (6.30) є виразом 2-го закону Кірхгофа для схеми, поданої на Рис. 6.16,а. Частина цієї схеми ліворуч полюсів $a-a'$ є послідовною еквівалентною схемою реального джерела, що містить ідеальне джерело напруги E та внутрішній опір R_i . Зовнішню характеристику джерела E представлено прямою $e-e'$ на Рис. 6.16,б, відповідно, джерело має нескінченну потужність. Безпосередньо підімкнути навантаження до нього неможливо, бо доступними є тільки полюси $a-a'$.

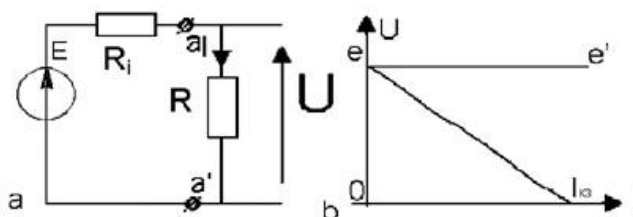


Рис. 6.16. Еквівалентна схема джерела з навантаженням

Струм у колі дорівнює

$$I = \frac{E}{R_i + R}, \quad (6.31)$$

напруга на навантаженні R

$$U = IR = \frac{ER}{R_i + R} = \frac{E}{1 + R_i / R}. \quad (6.32)$$

З виразу (6.32) видно, що за умови $R_i \rightarrow 0$, реальне джерело наближається до ідеального джерела напруги.

Реальні вимірювальні елементи відрізняються від ідеальних тим, що в них, окрім перетворення величини струму чи напруги у вимір, відбувається поглинання та накопичення енергії у активних і реактивних елементах вимірювача, які завжди є у конструкції вимірювального елемента. Крім того, слід розуміти, що вихідний вимір є результатом споживання вимірювачем частини енергії, що існує у ЕМК. Еквівалентною схемою такого споживача є внутрішній опір R_i вимірювального елемента. Враховуючи, що вольтметр підмикається паралельно до вимірювальної ділянки кола, доцільно вважати, що R_i вольтметра також під'єднується паралельно до вольтметра. Відповідно, у разі амперметра, ввімкненого у гілку послідовно, доцільно R_i амперметра з'єднувати послідовно з ним. Еквівалентні схеми реальних вольтметра і амперметра подані на Рис. 6.16,а,б.

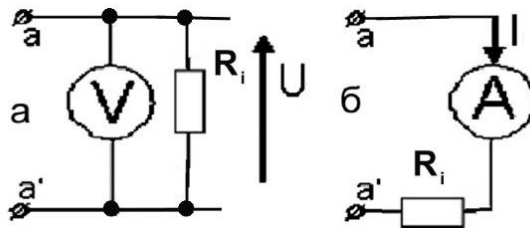


Рис. 6.16. Еквівалентні схеми реальних вимірювальних елементів

Розрахуємо похибки вимірювання напруги холостого ходу та струму короткого замкнення реального джерела за допомогою реальних вольтметра та амперметра. Схеми вимірювань подані на Рис. 6.17,а,б.

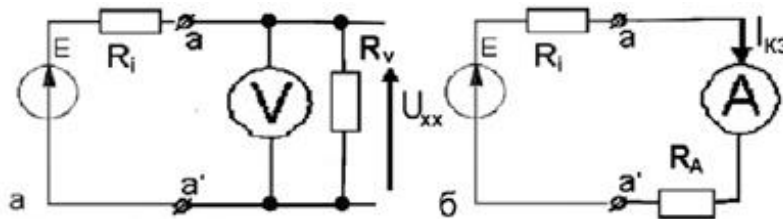


Рис. 6.17. Електричні схеми вимірювання реальними вимірювальними елементами

За другим законом Кірхгофа рівняння, що описує коло вимірювання напруги, подане на Рис. 6.17,а, має вигляд

$$E = I(R_i + R_v).$$

Напруга U_{xx} , яку вимірює вольтметр, дорівнює

$$U_{xx} = I * R_v = E \frac{R_v}{R_v + R_i}.$$

Відлік вольтметра має відносну інструментальну похибку, залежну від внутрішнього опору вольтметра

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E - U_{xx}}{E} = 1 - \frac{R_v}{R_v + R_i} = -\frac{R_i}{R_v + R_i}. \quad (6.33)$$

З виразу (6.33) витікає основна вимога до внутрішнього опору вольтметра: з метою зменшення інструментальної похибки, внутрішній опір вольтметра повинен бути якомога більше опорів кола, де вимірюється напруга.

За другим законом Кірхгофа рівняння, що описує коло вимірювання струму, подане на Рис. 6.17,б, має вигляд

$$E = I(R_i + R_A).$$

Струм короткого замкнення, який вимірює амперметр дорівнює

$$I_{кз} = E / (R_i + R_A).$$

Відлік амперметра має відносну інструментальну похибку, залежну від внутрішнього опору амперметра

$$\frac{\Delta I_{кз}}{I_{кз}} = \frac{E / R_i - E(R_i + R_A)}{E / R_i} = 1 - \frac{R_i}{R_i + R_A} = \frac{R_A}{R_i + R_A}. \quad (6.34)$$

З виразу (6.34) витікає основна вимога до внутрішнього опору амперметра: з метою зменшення інструментальної похибки, внутрішній опір амперметра повинен бути якомога менше опорів кола, де вимірюється струм.

6.7. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ:

1. Що таке ЕМК?
2. Які ви знаєте елементи ЕМК?
3. Що таке I та II закони Кірхгофа?
4. Які джерела живлення ви знаєте?
5. Чим відрізняються пасивні і активні елементи ЕМК?
6. Чим відрізняються реальні вимірювальні елементи від ідеальних?

7 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАНЬ

7.1 ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

Розв'язання багатьох наукових і технічних завдань пов'язане з вимірюванням інтервалів, що розділяють два характерних моменти часу одного процесу або кількох процесів у різних точках систем передавання інформації [7-9]. Вимірювання часових інтервалів (ЧІ) необхідні при розробці і випробуваннях всіляких схем затримки і синхронізації, при дослідженні цифрових систем, багатоканальних систем з часовим поділом каналів тощо. Вимірювач ЧІ є складовою частиною більшості вимірювальних приладів з цифровою індикацією результатів вимірювання, в яких вимірювана величина в решті решт перетворюється на часовий інтервал.

Усі сучасні прилади вимірювання ЧІ є цифровими і будуються за структурною схемою, поданою на Рис. 7.1. Принцип дії вимірювача полягає у лічбі кількості імпульсів з точно відомим періодом повторення, що розташовуються на вимірюваному часовому інтервалі. В даний час для вимірювання часових інтервалів, періоду сигналів і підрахунку числа імпульсів використовуються універсальні цифрові частотоміри.



Рис. 7.1. Структурна схема вимірювача часових інтервалів

Тобто,

$$T_{вим} = nT_{ет}, \quad (7.1)$$

де $T_{ет}$ – період повторення еталонних імпульсів;

n – кількість еталонних імпульсів за час вимірюваного інтервалу $T_{вим}$.

Цифрова частина приладу містить:

- генератор еталонних імпульсів (ГЕІ);
- часовий селектор (ЧС) (схема «логічне І»), на один вхід якого подається періодична послідовність еталонних імпульсів, на другий

вхід – прямокутний імпульс, тривалість якого дорівнює шуканому часовому інтервалу;

- лічильник кількості імпульсів (ЛІ), що пройшли на вихід ЧС протягом тривалості $T_{\text{вим}}$;
- цифровий індикатор;
- блок керування (БК), який об'єднує елементи у єдиний прилад і керує режимами роботи вимірювача (однократний, періодичний, з накопиченням результатів, з усередненням тощо) та встановлює необхідну частоту еталонних імпульсів і розрядність індикатора в залежності від очікуваного значення ЧІ та бажаної точності вимірювання.

На виході формувача часового інтервалу (ФЧІ) завжди встановлюється тригерний пристрій, що запускається в момент початку вимірюваного ЧІ, і скидається – в момент закінчення ЧІ. Схема формування імпульсів запуску і скидання тригера залежить від призначення вимірювача, діапазону вимірюваних ЧІ та форми вхідних сигналів, для яких виконується оцінка часових параметрів. Завдання оцінки можуть бути наступними:

- вимірювання періодів синусних коливань або періодичних послідовностей імпульсів різної форми;
- вимірювання тривалості імпульсів або їх частин (фронтів, верхівки);
- вимірювання часу спрацьовування пристроїв керування;
- вимірювання часу поширення сигналу у пристрої або біологічному об'єкті;
- вимірювання відстані до об'єкту за часом затримки відбитого від нього сигналу.

Різноманітність завдань і значень ЧІ вимагають розроблення різних структурних схем ФЧІ з різними вимогами щодо частотних властивостей та необхідних похибок вимірювання.

На Рис. 7.2 подані варіанти структурних схем ФЧІ для перелічених застосувань. На Рис.7.2,а подано схему ФЧІ для вимірювача періодів коливань. Схема вхідного кола залежить від діапазону періодів і рівнів вхідних коливань. Фіксація початку і закінчення вимірюваного періоду відбувається за допомогою компаратора (К), в якому порівнюються поточне значення вхідного коливання із пороговим значенням $U_{\text{п}}$. Якщо $U_{\text{вим}} > U_{\text{п}}$, вихідна напруга К стрибком переходить з низького рівня на високий, якщо $U_{\text{вим}} < U_{\text{п}}$ – таким же стрибком у протилежний бік. Для описаної роботи К необхідно виконати умову $U_{\text{п}} = KU_{\text{maxвим}}$, де $K < 1$. Для реалізації цієї умови необхідно: якщо $U_{\text{п}}$ має сталі значення, будувати вхідне коло за схемою підсилювача-обмежувача, щоб його максимальна вихідна напруга мала сталі значення, незалежно від значення напруги на вході приладу. Іншим шляхом є формування $U_{\text{п}}$ за допомогою пікового детектування (ПД) підсиленої вхідної напруги з подальшим діленням її для одержання потрібного $K < 1$. Саме такий спосіб показаний на Рис. 7.2,а. Для чіткої фіксації початку та кінця ЧІ компаратор повинен мати максимально можливу швидкодію, але це може

призвести до його хибних спрацьовувань (так званого «брязкоту») за рахунок наявності у вхідній напрузі високочастотних шумових складових. Для запобігання цьому явищу після компаратора встановлюють тригер Шмітта (ТШ) – гістерезисний елемент, який спрацьовує тільки за першим перепадом напруги на виході К. на виході ТШ діє прямокутний імпульс, з тривалістю, що дорівнює шуканому ЧІ.

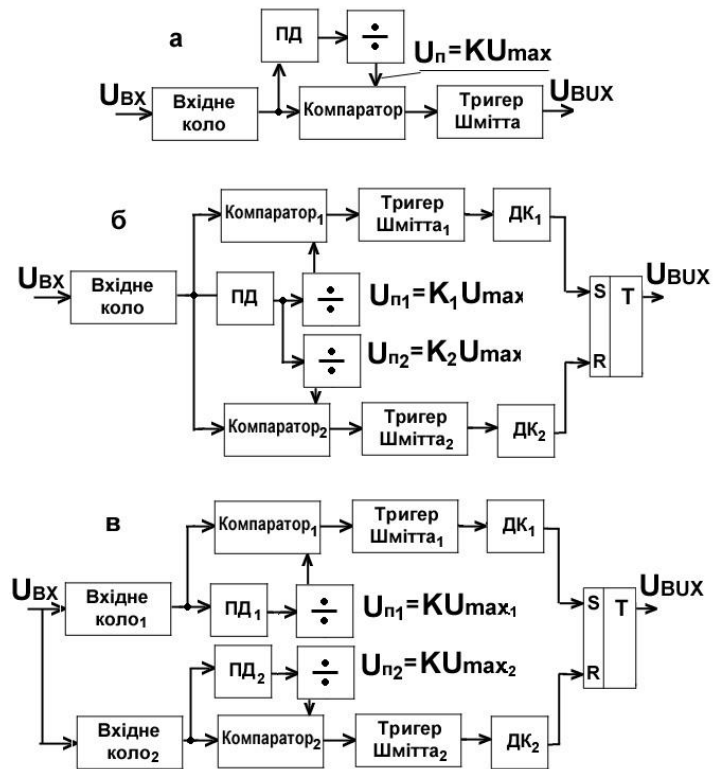


Рис. 7.2. Структурні схеми формувача часових інтервалів

На Рис. 7.2,б подано структурну схему ФЧІ, пристосовану для вимірювання тривалості фронтів імпульсів, які визначаються як інтервали часу між заданими миттєвими значеннями імпульсу (наприклад, $(0,1 \dots 0,9)U_{max}$). Для вимірювання цієї тривалості використано два компаратори, порогові напруги для яких формуються двома окремими дільниками напруги (наприклад, $K_1 = 0,9, K_2 = 0,1$). За допомогою диференціальних кіл ДК₁ та ДК₂ формуються короткі імпульси, що відповідають моментам $0,1 \dots 0,9)U_{max}$. Вони використовуються для запуску та скидання тригера Т, який формує шуканий ЧІ.

На Рис. 7.2,в подано структурну схему формувача ЧІ, пристосованого для визначення часу затримки сигналу у елементах системи або часу поширення сигналу у середовищі. Це двоканальна схема, яка працює подібно описаним раніше. Коефіцієнти підсилення вхідних кіл можуть бути різні – в залежності від рівня затриманого сигналу. Суттєвою вимогою до вхідних кіл є близькість їх фазових характеристик. Різниця фазових характеристик призводить до систематичної похибки, залежної від форми досліджуваних сигналів.

7.2 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЧА ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

При цифровому вимірюванні часових інтервалів виділяють такі похибки:

- похибка перетворення;
- похибка міри;
- похибка порівняння (дискретності, квантування).

Розглянемо кожну із складових похибок.

Похибка перетворення обумовлена в основному шумовою завадою, що виявляється при формуванні часового інтервалу за допомогою компаратора. Розглянемо утворення цієї похибки на прикладі вимірювання періоду синусного коливання. Часову діаграму процесів на вході компаратора подано на Рис. 7.3.

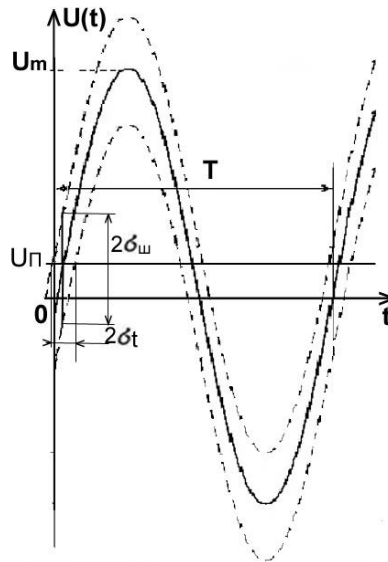


Рис. 7.3. Виникнення похибки перетворення

Напряга, що діє на вході компаратора має вигляд

$$U(t) = U_m \sin \omega t + N(t),$$

де $N(t)$ – шум з дисперсією $\sigma_{ш}^2$. Відношення сигнал/шум за напругою

$$q = \frac{U_m}{\sqrt{2}\sigma_{ш}}.$$

Визначимо відхилення моменту рівності опорної напруги і миттєвого значення синусного коливання за рахунок шуму. Крутість нахилу коливання $U_m \sin \omega t$ в точці $t = 0$ $\frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega U_m$ (ця крутість мало відрізняється від крутості зміни коливання у точці порівняння з опорною $U_{п}$). З Рис. 3.1.3 видно, що $\frac{\sigma_{ш}}{\sigma_t} = \omega U_m$. Підставляючи в цей вираз відношення $q = \frac{U_m}{\sqrt{2}\sigma_{ш}}$, одержимо

$$\sigma_t = 1/\sqrt{2}\omega q. \quad (7.2)$$

Враховуючи, що період – це часовий інтервал між точками коливання з однаковими фазами і роблячи припущення, що значення шумів у цих двох точках некорельовані, одержимо $\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{t+T}^2} = \sigma_t\sqrt{2}$. Відносна похибка перетворення

$$\delta_T = \frac{\sigma_T}{T} = \frac{1}{2\pi q}. \quad (7.3)$$

У Таблиці 7.1 наведено кілька значень відносної середньоквадратичної похибки вимірювання періоду в залежності від відношення сигнал/шум для синусного коливання.

Таблиця 7.1 Значення відносної середньоквадратичної похибки вимірювання періоду

q	5	10	20	30	100
$q_{дБ}$	14	20	26	29,5	40
δ_T	0,032	0,016	0,008	0,0053	0,0016

Як видно з таблиці, одержання високої точності вимірювання часових параметрів коливань можливе за рахунок зменшення рівня шумів у вимірювальному колі. Слід додатково зазначити, що наведена оцінка похибки одержана для одного виміру. Збільшуючи кількість вимірних періодів, тим самим зменшуючи похибку у \sqrt{n} разів, можна досягти бажаного значення похибки. У блоці керування вимірювача (див. Рис. 7.1) передбачено вимірювання заданої кількості періодів коливання.

Похибка міри обумовлена, в першу чергу, нестабільністю частоти повторення еталонних імпульсів, що виробляються ГЕІ (Рис. 7.1). Для зменшення цієї похибки генератор виконують за схемою з кварцовою стабілізацією частоти. Відносна нестабільність частоти кварцового генератора визначається виразом:

$$\delta_f = \frac{\Delta f_{KB}}{f_{KB}},$$

де Δf_{KB} - абсолютна нестабільність частоти кварцового генератора, f_{KB} - частота налаштування кварцу. На практиці значення δ_f не перевищує $10^{-5} - 10^{-6}$. Нестабільність частоти кварцового генератора включає дві складові – довготривалу і короткочасну. Довготривала нестабільність частоти пояснюється, в основному, старінням кварцу, тобто має систематичний характер і вносить систематичну похибку виміру часових інтервалів. Для її зменшення кварцовий генератор розташовують у термостаті. Періодичною

повіркою генератора і коригуванням частоти величина δ_f може бути зменшена ще на порядок. Відносна похибка дорівнює відносній нестабільності частоти кварцового генератора $\delta_t = \delta_f$. Абсолютна похибка вимірювання ЧІ за рахунок ГЕІ прямо пропорційна тривалості вимірюваного часового інтервалу τ :

$$\sigma_{KB} = \delta_t \tau.$$

Третя складова похибки, похибка порівняння, обумовлена дискретизацією неперервної величини – вимірюваного інтервалу часу. Дану складову похибки називають також похибкою дискретності, або похибкою квантування. Вона виникає внаслідок того, що імпульс з виходу компаратора і послідовність еталонних імпульсів, у загальному випадку, несинхронні сигнали. На Рис. 7.4 подано коливання на входах і виході часового селектора. Вимірюване значення ЧІ замінюється цілим числом n періодів еталонних імпульсів t_0 . Це методична похибка, обумовлена дискретизацією неперервної

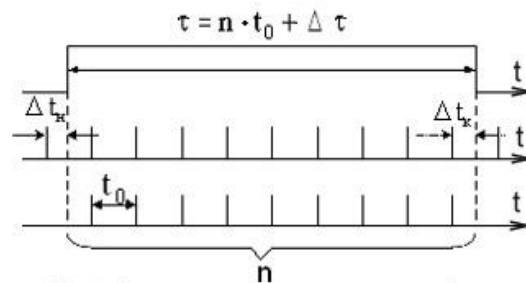


Рис. 7.4. Імпульси на входах і виході часового селектора

величини – вимірюваного ЧІ. Як видно з рис. 7.4, похибка вимірювання складається з похибок визначення початку (Δt_H) і кінця (Δt_K) часового інтервалу, розподілених за рівномірним законом у межах $(-t_0, 0)$ і $(0, t_0)$, відповідно. Сумарна похибка є випадковою величиною, розподіленою за законом трикутника (Сімпсона). Граничне значення похибки дискретності (квантування) $\Delta_{Dmax} = \pm t_0$.

Максимальна відносна похибка дискретності

$$\delta_{Dmax} = \pm \frac{t_0}{\tau} = \pm \frac{t_0}{nt_0} = \pm \frac{1}{n},$$

Виходячи з трикутного закону розподілу ймовірностей, середньоквадратичне значення похибки дискретності (квантування) апріорно невідомого часового інтервалу $\sigma_D = t_0/\sqrt{6}$.

Абсолютна похибка цифрового вимірювача часових інтервалів визначається як сума похибок перетворення, міри і квантування

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\tau} + \sigma_{KB} + \sigma_D = \frac{\tau}{2\pi q} + \delta_f \tau + \frac{t_0}{\sqrt{6}}, \quad (3.4)$$

Де похибку перетворення подано для часового інтервалу, що дорівнює періоду коливання.

7.3 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Порівняйте властивості схем формування часових інтервалів.
2. Від чого залежать похибки вимірювання часових інтервалів?

8 ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

8.1 Основні положення

Частота — фізична величина, що дорівнює кількості однакових подій за одиницю часу. Вона є характеристикою будь-яких процесів, які регулярно повторюються (кількість подій за одиницю часу) або величиною, що подає: кількість рухів, коливань, повторень за одиницю часу тощо. До регулярних процесів належать періодичні, такі як коливання або обертання, і випадкові процеси, що відбуваються неперіодично, але з певною закономірністю. Частота — одна з основних характеристик багатьох процесів у природі та техніці. Наприклад, частота звукової хвилі сприймається людським вухом як тон, частота електромагнітної хвилі світлового діапазону сприймається людським оком як колір. Для періодичних коливань частота

$$f = 1/T,$$

де T – період коливань.

Одиниця частоти 1 Герц визначається як одне коливання в одну секунду. Частота і час нерозривно пов'язані між собою, тому вимірювання тієї чи іншої величини диктується зручністю експерименту і необхідною похибкою вимірювання. Частота електромагнітних коливань пов'язана з довжиною однорідної пласкої хвилі у вільному просторі $\lambda = c/f$, де $c = 299792.5 \pm 0.3$ км/с – швидкість світла. У радіотехнічній практиці найчастіше вимірюється частота, рідше період, на високих частотах - довжина хвилі. Вимірювання частоти виконується з найбільшою точністю порівняно з іншими видами радіовимірювань, тому часто фізичні величини, що підлягають оцінці, перетворюють у частотні подання для подальшого точного вимірювання.

Розглянемо основні методи вимірювання частоти електричних коливань.

8.2 МЕТОД ПЕРЕЗАРЯДУ КОНДЕНСАТОРА

Метод заснований на вимірюванні середнього струму розряду конденсатора, що періодично заряджається від еталонного джерела з частотою коливання, яка підлягає вимірюванню. Спрощену структурну схему конденсаторного вимірювача частоти подано на Рис. 8.1.

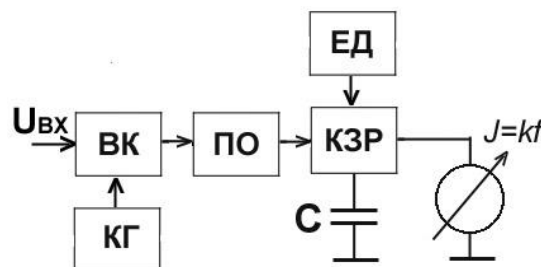


Рис. 8.1. Структурна схема конденсаторного частотоміра

Вимірювач діє наступним чином. Коливання, частоту якого слід виміряти, подається на вхідний комутатор (ВК), який в режимі «Вимірювання», підмикає вхідне коливання до входу підсилювача-обмежувача (ПО), який керує комутатором заряду-розряду (КЗР) конденсатора C . Протягом додатнього напівперіоду вхідного коливання КЗР під'єднує конденсатор до еталонного джерела живлення (ЕД) і він швидко заряджається до напруги U_{max} , яку може забезпечити ЕД. Протягом від'ємного напівперіоду вхідного коливання КЗР під'єднує конденсатор до вимірювача сталого струму, через який конденсатор розряджається до нуля. У підсумку вимірюється середнє значення струму періодичної послідовності імпульсів сталої амплітуди і тривалості (тривалість залежить виключно від сталої часу кола розряду конденсатора) та змінної частоти. Тобто вимірянйй струм

$$I_{BUM} = kf,$$

де k – сталий коефіцієнт, залежний від параметрів ЕД і вимірювача струму. Відповідно, шкала вимірювача струму може бути проградуїювана в одиницях частоти. Для періодичного калібрування вимірювача застосовується калібрувальний генератор (КГ) стабільної частоти, який під'єднується до вимірювача за допомогою ВК в режимі «Калібрування».

Нижня межа вимірювання частоти обмежується інерційністю вимірювача струму, бо око помічає коливання стрілки, якщо частота коливань має значення (10...20) Герц. Верхня межа визначається сумою сталих часу кіл заряду і розряду конденсатора C . Стала часу заряду дорівнює $\tau_{зар} = C(R_k + R_i)$, де R_k – опір КЗР, R_i – внутрішній опір джерела живлення. Стала часу розряду дорівнює $\tau_{розр} = C(R_k + R_A)$, де R_A – опір вимірювача струму. Протягом часу, що дорівнює 3τ , заряд і розряд конденсатора досягає значення, що відрізняється від усталеного на 5%. Тобто, вимірювання з такою похибкою можливе на частоті

$$f_B < \frac{1}{6\pi(\tau_{зар} + \tau_{розр})}.$$

Ця частота не перевищує одиниць мегагерц. Похибка вимірювання, в основному, залежить від класу точності вимірювача струму і складає (1...2) %.

8.3 РЕЗОНАНСНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Резонансний метод полягає у порівнянні вимірюваної частоти з власною резонансною частотою градуїюваного вимірювального коливального контуру. Метод застосовується в діапазоні високих і надвисоких частот. Спрощену принципову схему резонансного частотоміра наведено на Рис. 8.2. Вимірювач складається з коливального контуру, який через елементи зв'язку (на Рис. 8.2 – індуктивності) під'єднано до джерела вимірюваного коливання та до індикатора напруги. Резонансна частота контуру налаштовується конденсатором, ємність якого змінюється за допомогою прецизійного механізму з шкалою, проградуїюваною у одиницях частоти. Відлік частоти на шкалі виконується після одержання максимального відліку індикатора, тобто

за умови налаштування контуру в резонанс з вимірюваною частотою коливання. Якщо шкала механізму налаштування градуйована в довжинах хвиль, то такий пристрій називають резонансним хвилеміром.

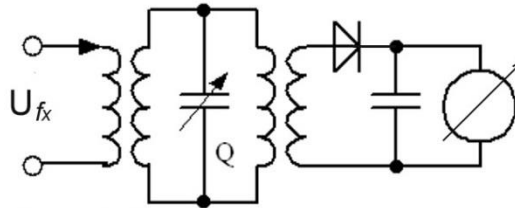


Рис. 8.2. Спрощена схема резонаторного частотоміра

Похибка фіксації резонансу залежить від значення добротності Q навантаженого вимірювального контуру і роздільною здатністю індикатора. З рівняння резонансної кривої контуру можна отримати формулу для розрахунку відносної похибки від неточності фіксації резонансу:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{\sqrt{\left(\frac{U_0}{U_{\Delta f}}\right)^2 - 1}}{2Q},$$

де U_0 – відлік індикатора при резонансі;

$U_{\Delta f}$ – відлік індикатора при розладі вимірювального контуру на Δf .

Вимірювальний контур резонансного частотоміра в залежності від діапазону частот, для якого він призначений, виконується або із зосередженими, або з розподіленими параметрами. Резонансні частотоміри зі средоточеними параметрами в даний час повністю витіснені цифровими частотомірами, а частотоміри з розподіленими параметрами широко застосовуються в діапазоні НВЧ. Відносна похибка вимірювання частоти в діапазоні НВЧ має значення $\delta_f = \pm(10^{-3} \dots 5 \times 10^{-4})$.

8.4 МЕТОД ПОРІВНЯННЯ НЕВІДОМОЇ ЧАСТОТИ З ЧАСТОТОЮ ЗРАЗКОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Метод полягає у порівнянні в той, чи інший спосіб невідомої частоти коливання із точно відомою частотою внутрішнього генератора і індикації саме цієї частоти. Метод отримав широке поширення завдяки його простоті, придатності для використання практично в будь-якому діапазоні частот з порівняно високою точністю результату вимірювання.

В якості джерел зразкових частот застосовують зразкові міри частоти, так звані стандарти частоти, з нестабільністю за $10^{-9} - 10^{-11}$ за добу. Для градуювання вимірювальних генераторів сигналів використовують синтезатори частоти та інші генератори, похибка встановлення частоти яких на порядок, а нестабільність частоти за час градуювання на 3 порядки менше, ніж у генератора, що повіряється.

Індикатором рівності або кратності частот може бути осцилограф або нелінійний перетворювач частоти. Відповідно, метод порівняння для

вимірювання частоти реалізують двома способами: осцилографічним та гетеродинним.

8.4.1 Осцилографічний спосіб порівняння частот

Цей спосіб придатний для будь-яких частот в межах смуги пропускання електронного осцилографа. Вимірювання можна проводити за допомогою лінійної, синусної або колової розгортки.

Метод лінійної розгортки. Вимірювана частота коливання, поданого на сигнальний вхід осцилографа порівнюється з частотою міток, які утворюються під час модуляції яскравості зображення за допомогою генератора міток відомої частоти. Для цього встановлюють на екрані кілька періодів вимірюваної частоти і регулюють частоту міток так, щоб їх зображення потрапляло в одну і ту ж точку кожного періоду. У цьому випадку вимірювана частота

$$f_x = n f_M,$$

де n – число міток, розташованих у межах одного періоду досліджуваного коливання. Похибку вимірювання можна аналізувати подібно розглянутій раніше похибці цифрового вимірювання часового інтервалу. З одного боку, бажано якомога збільшити кількість міток на періоді коливання, тобто брати $f_x < f_M$, з іншого – цьому заважає обмежена розрізнявальна здатність екрану і точність синхронізації осцилографа. Практично, важко досягти відносної похибки, меншої за 5%.

Метод синусоїдної розгортки. Синусоїдна розгортка має місце в тому випадку, якщо внутрішній генератор розгортки вимкнути і подати напругу зразкової частоти в канал X, а невідомої – канал Y. Змінюючи зразкову частоту, домагаються отримання осцилограми у вигляді фігури Лісажу, яка є нерухомою або повільно рухається. При рівності або кратності частот фігура буде нерухомою, а якщо вона обертається, то швидкість обертання або період повторення її форми характеризує нерівність частот.

Нерухомі фігури на екрані спостерігаються при виконанні співвідношення:

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n},$$

де m і n – цілі числа.

Відношення частот коливань визначається з виразу:

$$\frac{N_y}{N_x} = \frac{f_y}{f_x},$$

де N_y та N_x – число перетинів інтерференційної фігури з горизонтальною та вертикальною лініями, що не проходять через точки перетину самої фігури (Рис. 8.3). Метод синусоїдної розгортки застосовується при кратності частот до 10. При більшій кратності фігури виходять складними і важко полічити число їх перетинів з прямими лініями. Метод застосовується в діапазоні частот від 10 Гц до 20 МГц. Діапазон частот в основному визначається частотними властивостями осцилографа.

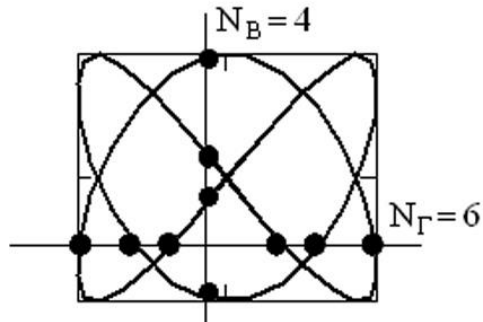


Рис. 8.3. Вимірювання частоти за допомогою фігур Лісажу

Метод колової розгортки. Колова розгортка утворюється тоді, коли напруга синусної форми зразкової частоти подається на входи X та Y осцилографа із фазовим зсувом, що дорівнює 90^0 . Напругу вимірюваної частоти f_x подають в канал Z осцилографа для модуляції електронного променя за яскравістю. При рівності частот половини кола не видно (темна), інша половина висвічується (Рис. 8.4,а). Якщо $f_x > f_z$, на колі з'являться темні і світлі ділянки – штрихи (Рис. 8.4,б). Кількість темних та світлих штрихів дорівнює кратності частот. Осцилограма нерухома при точній рівності частот, в іншому випадку - вона обертається. За коловою розгорткою можна порівнювати частоти, кратність яких визначається розрізнявальною здатністю екрана осцилографа і може доходити до 100.

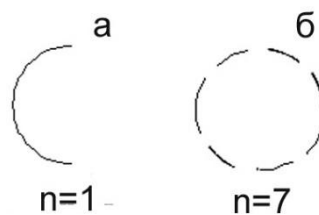


Рис. 8.4. Визначення кратності частот на коловій розгортці

8.4.2 Гетеродинний метод

Метод ґрунтується на утворенні комбінаційних складових у нелінійному елементі, на вхід якого подаються синусне коливання, частоту якого слід виміряти, та синусне коливання зразкової частоти

$$U_x(t) = U_{mx} \cos 2\pi f_x t,$$

$$U_{зр}(t) = U_{зрх} \cos 2\pi f_{зр} t.$$

На виході нелінійного елемента з'являється коливання, в спектрі якого є складова з різницевої частотою f_B , званою частотою биттів. Якщо $f_x = f_{зр}$, частота биттів дорівнює нулю, тому даний метод часто називають методом нульових биттів. Структурну схему гетеродинного частотоміра, заснованого на способі нульових биттів наведено на Рис. 8.5,

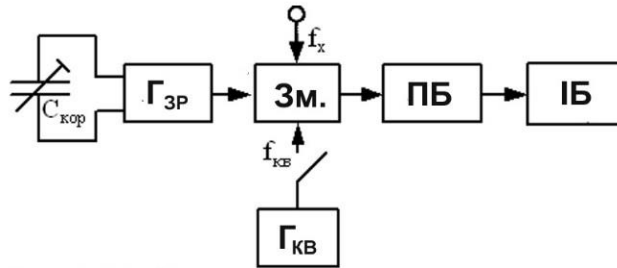


Рис. 8.5. Спрощена схема гетеродинного вимірювача частоти

де $\Gamma_{зр}$ – генератор з плавним налаштуванням – джерело відомої зразкової частоти; $\Gamma_{кв}$ – кварцовий генератор, що використовується для калібрування зразкового генератора перед кожним вимірюванням частоти; Зм – змішувач, у якому формується частота биттів; ПБ – підсилювач коливання биттів; ІБ – індикатор биттів. В якості індикатора нульових биттів можуть бути використані гучномовець, навушники, стрілочний прилад тощо. На діаграмі Рис. 8.6 показано процес зміни частоти биттів f_B в залежності від зміни $f_{зр}$ при $f_x = const$.

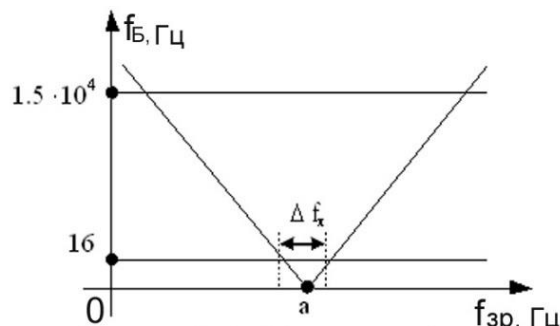


Рис. 8.6. Частота биттів на виході змішувача

Якщо ІБ має вигляд звуковідтворювального пристрою, різницю частот можна фіксувати у діапазоні 16 Гц...15 кГц, тобто у діапазоні чутливості людського вуха. Виходячи з цього, абсолютна похибка встановлення частоти $f_{зр}$ буде завжди більша за 16 Гц. Цю похибку можна легко усунути, якщо в якості ІБ застосувати магнітоелектричний мікроамперметр. При $f_B < 10$ Гц стрілка буде коливатися. По мірі зближення частот, частота цих механічних коливань зменшується і при рівності частот коливання припиняються. Перед початком вимірювання на вхід Зм подаються коливання від зразкового генератора і від кварцового генератора. За допомогою корегувального конденсатора С частота $\Gamma_{зр}$ підлаштовується під одну з гармонік кварцового генератора. Налаштування відбувається за допомогою того ж ІБ. Власне відлік частоти вимірюваного

коливання відбувається за шкалою частоти зразкового генератора. Відносна похибка гетеродинних частотомірів становить $(5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-6})$.

Гетеродинні частотоміри поступово витісняються цифровими. Проте, в експлуатації знаходиться значна кількість частотомірів різних типів, що перекривають діапазон частот від 125 кГц до 40 МГц і від 2,5 до 78 ГГц.

Гетеродинний метод вимірювання частоти знайшов широке застосування у системах фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), завдяки яким відбувається налаштування приймачів, стабілізація частоти генераторів, модуляція, демодуляція сигналів і їх фільтрація на тлі шумів. За допомогою системи ФАПЧ можна виявляти сигнали у діапазоні частот і вимірювати їхні частотні параметри. Структурну схему системи ФАПЧ, яку можна використати для вимірювання частоти сигналу подано на Рис.8.7.

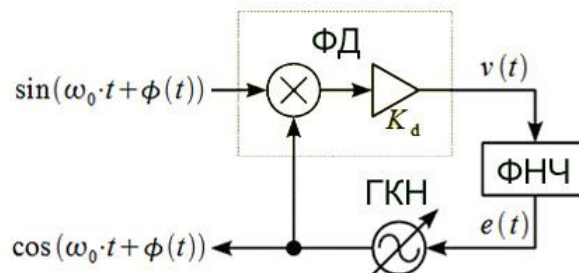


Рис. 8.7. Структурна схема ФАПЧ

Вхідний сигнал, частоту якого слід виміряти, подається на вхід фазового детектора (ФД), де порівнюється за миттєвою фазою з коливанням генератора, керованого напругою (ГКН). Фазовий детектор – це помножувач миттєвих значень напруг вхідних сигналів. У випадку, коли комбінаційне коливання, утворене на виході ФД, потрапляє у смугу прозорості ФНЧ, вихідне коливання ФНЧ $e(t)$ використовується для керування частотою ГКН. Нульова напруга керування буде, якщо частоти порівнюваних коливань дорівнюють одна одній, а фази зсунуті на 90^0 . Після досягнення рівноваги можна вимірювати частоту коливання ГКН, яка дорівнює шуканій частоті. Система ФАПЧ надає ряд переваг при вимірюванні частоти:

- можна вимірювати частоту сигналу, обмеженої тривалості, бо ГКН «запам'ятовує» частоту сигналу;
- за рахунок вузької смуги ФНЧ суттєво покращується відношення сигнал/шум, що зменшує похибку перетворення сигналу у вимірювачі частоти;
- з'являється можливість автоматизованого пошуку сигналів і визначення їх частотних параметрів. Можливість виникає в разі додавання у коло керування ГКН зовнішньої керувальної напруги, яка змінюється за лінійним законом. Таким чином виконується пошук сигналу. У разі потрапляння різниці частот сигналів у смугу прозорості ФНЧ, система переходить у режим зрівняння частот.

Схема, подана на Рис. 8.7 є спрощеною. У реальній схемі вхідний сигнал завжди підсилюється та обмежується за амплітудою, щоб уникнути залежності

керувальної напруги від рівня вимірюваного сигналу. Сучасні системи ФАПЧ у переважній більшості випадків є цифровими і в тому, чи іншому місці системи є цифрові коди, які несуть інформацію про частоту ГКН. Це дозволяє (при відповідному дешифруванні) безпосередньо відобразити значення вимірюваної частоти сигналу.

8.4.3 Цифровий метод вимірювання частоти

Суть методу цифрового вимірювання частоти полягає у лічбі періодів досліджуваного коливання протягом каліброваного інтервалу часу, який формується у вимірювачі частоти з високою точністю та стабільністю. Доцільно таку процедуру виконувати за допомогою цифрових електронних елементів, тому змінну напругу, частоту якої f_x потрібно виміряти, перетворюють на послідовність коротких однополярних імпульсів з частотою повторення f_x . Вимірювана частота дорівнює

$$f_x = \frac{N}{T_0},$$

де T_0 – часовий інтервал вимірювання;

N – кількість періодів вимірюваної частоти за час T_0 .

Зокрема, якщо $T_0 = 1\text{с}$, то N чисельно дорівнює частоті f_x . Прилади, побудовані на основі цього методу, називають електронно-лічильниковими частотомірами. Результат вимірювання з'являється на табло передньої панелі приладу у вигляді послідовності цифр, тому такі прилади часто називають цифровими частотомірами.

Спрощену структурну схему електронно-лічильникового частотоміра наведено на Рис. 8.8, а форми напруг на виходах функціональних блоків – на Рис. 8.9.

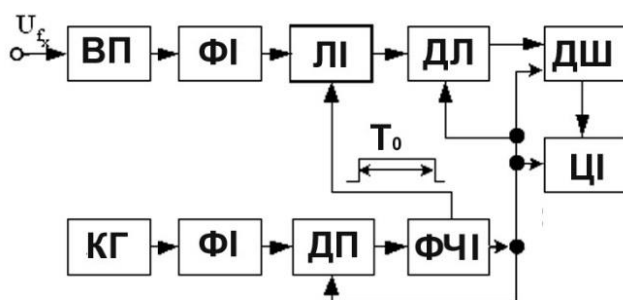


Рис. 8.8. Спрощена схема цифрового частотоміра

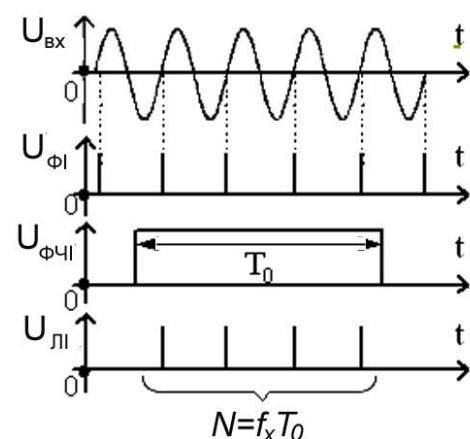


Рис. 8.9. Форми напруг у схемі цифрового частотоміра

Вхідна напруга невідомої частоти подається на вхідний пристрій (ВП), де вона стабілізується за амплітудою і подається на формувач коротких імпульсів (ФІ), частота повторення яких дорівнює частоті вхідного коливання. Сформовані імпульси подаються на один вхід схеми «логічне І»(ЛІ). На другий вхід подається прямокутний імпульс, тривалість якого дорівнює часовому інтервалу вимірювання. Формування імпульсу відбувається наступним чином. Прилад містить термостабілізований кварцовий генератор (КГ), частота якого $f_{KB} = 5$ або 10 МГц, відповідно, період $t_0 = 0,1$ або $0,2$ мкс. Коливання на виході КГ формуються у короткі імпульси за допомогою формувача (ФІ). Для одержання необхідного часового інтервалу вимірювання встановлено декадні подільники частоти (ДП), на виході яких утворюються частоти в 10^n ($n=1, 2, 3, \dots, 8$) рази нижчі за частоту КГ, тобто $100, 10$ і 1 кГц, $100, 10, 1$ і $0,1$ Гц, які керують роботою формувача часового інтервалу (ФЧІ). На виході ФЧІ одержуємо імпульс бажаної тривалості, який подається на другий вхід схеми «логічне І». Двійковий лічильник (ДЛ) підраховує кількість N імпульсів за кожний часовий інтервал t , відповідно, вимірює частоту вхідного коливання за формулою

$$f_x = \frac{N}{10^n t_0} = N \times 10^{-n} f_{KB}.$$

Двійкове число N через дешифратор (ДШ) подається на цифровий індикатор (ЦІ) для відображення результату вимірювання. ФЧІ також формує імпульси скидання лічильників та індикатора для періодичного повторення процедури вимірювання.

При цифровому вимірюванні частоти є кілька складових сумарної похибки. В тому числі:

- похибка міри;
- похибка перетворення;
- похибка квантування.

Розглянемо послідовно ці складові похибки.

Похибка міри. Результат вимірювання частоти має вид $f_x = 1/T_0$.

Мірою в даному випадку є часовий інтервал вимірювання T_0 . Абсолютна похибка опосередкованого вимірювання дорівнює

$$\Delta f_x = \left| \frac{\partial f_x}{\partial T_0} \right| \Delta T_0, \text{ де } \frac{\partial f_x}{\partial T_0} = -\frac{n}{T_0^2}.$$

Відповідно, абсолютна похибка міри визначиться як

$$\Delta f_x = \frac{n}{T_0^2} \Delta T_0 = \frac{n}{T_0} \frac{\Delta T_0}{T_0}.$$

$$\text{Відносна похибка міри } \delta f_x = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta f_x}{n} T_0 = \frac{\Delta T_0}{T_0} = \delta f_{\text{КВ}},$$

тобто, відносна похибка міри дорівнює відносній нестабільності частоти кварцового генератора $\delta f_{\text{КВ}}$.

Похибка перетворення виникає у формувачі імпульсів і пов'язана з перетворенням в короткі імпульси переходів через нуль вимірюв - ряемого гармонічного сигналу (Рис. 8.8). У режимі вимірювання частоти даною похибкою можна знехтувати, оскільки виконується усереднення великого числа періодів частоти f_x за час вимірювання T_0 .

Похибка квантування (дискретності). Абсолютна похибка дискретної лічби виникає внаслідок несинхронності вхідної напруги вимірюваної частоти і часового інтервалу T_0 , отриманого з частоти кварцового генератора. Внаслідок цього початок і кінець інтервала T_0 не збігається з початком і кінцем періодів імпульсів вимірюваної частоти. Як і випадку вимірювання тривалості (див. розд. 8.2), похибка квантування розподілена за законом Сімпсона в інтервалі $f_d = 1/T_0$. Частота f_d називається одиницею молодшого розряду по частоті і показує, з якою граничною похибкою буде виконуватися вимірювання частоти. Наприклад, якщо $T_0 = 0,1$ с, $f_d = 10$ Гц і на табло частотоміра буде відображатися значення частоти з точністю до десятків герц. тобто, при вимірюванні частоти 534 Гц протягом $T_0 = 0,1$ с, на індикаторі можуть бути отримані значення частоти 540 або 530 Гц. Середньоквадратичне значення похибки, розподіленої за законом Сімпсона, становить $\sigma_{f_x} = \frac{f_d}{\sqrt{6}} = \frac{1}{\sqrt{6}T_0}$,

$$\text{відносна похибка квантування } \delta f_x = \frac{\sigma_{f_x}}{f_x} = \frac{1}{f_x \sqrt{6}T_0},$$

$$\text{максимальна відносна похибка } \delta f_{x\text{max}} = \pm \frac{1}{f_x T_0}.$$

Наприклад, цифровий частотомір з часом вимірювання $T_0 = 1$ с виконує вимірювання коливань з частотами $F_1 = 10$ МГц і $F_2 = 100$ Гц. Знайти граничні значення відносної похибки квантування $\delta f_{x\text{max}}$, похибку міри δf_x і сумарної похибки δf_B . Відносна нестабільність частоти кварцового генератора $\delta f_{\text{КВ}} = 10^{-7}$, похибкою перетворення знехтувати.

Розв'язок. Для сигналів з частотами F_1 і F_2 похибка міри буде однаковою і складе $\delta f_{\text{КВ}} = 10^{-7}$. Відносна похибка квантування для сигналу з частотою F_1 складе $\delta F_{1\text{max}} = \pm \frac{1}{F_1 T_0} = \pm \frac{1}{1 \times 10^7} = \pm 1 \times 10^{-7}$, для сигналу з частотою F_2 - $\delta F_{2\text{max}} = \pm \frac{1}{F_2 T_0} = \pm \frac{1}{1 \times 100} = \pm 1 \times 10^{-2}$.

Сумарна відносна похибка для першого сигналу складе:

$$\delta_{F_1} = \sqrt{(\delta f_{\text{КВ}})^2 + (\delta F_{1\text{max}})^2} = \sqrt{2} \times 10^{-7},$$

для другого

$$\delta_{F_2} = \sqrt{(\delta f_{\text{кв}})^2 + (\delta F_{2\text{max}})^2} = 10^{-2}.$$

Таким чином, на низьких частотах спостерігається різке збільшення похибки вимірювання частоти. Одним із способів підвищення точності є збільшення часу вимірювання T_0 .

Сучасні електронно-лічильні частотоміри є автоматичними приладами, що відрізняються високою точністю вимірювань, швидкодією, зручністю відліку і простотою роботи з ними. Заміна резонансних і гетеродинних частотомірів зменшує час вимірювання в 30 – 50 разів і знижує похибку на 4 – 5 порядків. Наявність на виході результату вимірювання у вигляді цифрового коду дозволяє використовувати їх в вимірювально-інформаційних системах та системах управління. Досягнення в галузі мікроелектроніки дозволили створювати електронно - лічильні частотоміри на базі інтегральних мікросхем і мікропроцесорів. Застосування останніх значно збільшило надійність, зменшило габарити, масу і споживану енергію, дозволило досягти високого ступеня автоматизації вимірювань.

8.5 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Наведіть основні методи вимірювання частоти коливань.
2. В якому діапазоні застосовується резонансний метод вимірювання частоти?
3. Які обмеження має метод заряду/розряду конденсатора?
4. Опишіть принцип дії гетеродинного частотоміра.
5. Оцініть вплив дискретності на точність вимірювання частоти цифровим методом.

9 ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ

9.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

У практиці електрорадіовимірювань вимірювання напруги є поширеною операцією. При цьому визначаються різниця потенціалів або падіння напруги на ділянці електричного кола (на її елементі). Одиницею напруги є 1 Вольт (В). Метою вимірювання сталої напруги є визначення його значення і знаку полярності. При вимірюванні змінної напруги визначається її параметр (амплітудне, середнє, середньоквадратичне або середньовипрямлене значення).

Великий інтервал (від 10^{-9} до 10^4 В) та широкий діапазон частот (від нульових до НВЧ) вимірюваних напруг, мала потужність джерел напруги, а також висока точність вимірювання призвели до необхідності використання великої кількості методів і засобів вимірювання.

Незважаючи на уявну простоту вимірювання напруги, існує ряд моментів, на які на практиці необхідно звернути увагу. Так, зокрема, слід враховувати вплив вхідного опору вольтметра під час вимірювання як постійних, так і змінних напруг. Більш того, при вимірюванні змінних напруг необхідно враховувати реактивну складову вхідного опору вольтметра, вплив якого на результат зростає з ростом частоти сигналу.

При вимірюванні параметрів змінних напруг необхідно враховувати конструктивні особливості вольтметра. У вольтметрах змінного струму здійснюється перетворення змінної напруги в постійну, відповідну одному з його параметрів. Однак, всі вольтметри змінного струму, за винятком імпульсних, градууються в середньоквадратичних значеннях напруги синусної форми. Таким чином, у вольтметрах змінного струму відображається параметр змінного струму (середньоквадратичне значення), який, у загальному випадку, не відповідає вимірюваному параметру. Це має суттєве значення при вимірюванні напруги, форма яких відрізняється від синусної. Для оцінки значення необхідного параметра змінної напруги необхідно, в загальному випадку, знати вид перетворювача вольтметра, форму вимірюваної напруги, а також тип входу вольтметра (відкритий чи закритий, тобто пропускає, не пропускає сталий струм). Нехтування цією інформацією призводить, як правило, до істотних похибок результату вимірювання.

Вольтметри закордонних виробників мають різні фірмові позначення, в яких завжди є назва фірми-виробника. Крім поділу на види, вольтметри прийнято ділити на аналогові і цифрові.

9.2 ВИМІРЮВАНІ ПАРАМЕТРИ НАПРУГИ

Залежно від характеру змін напруги в часі розрізняють сталу та змінну напругу. У свою чергу, змінну напругу можна розділити на періодичне і неперіодичне коливання. Для напруги, значення якої періодично змінюється, його форма може бути довільна. Зазвичай на практиці вимірюють сталу

напругу і її повільні зміни та параметри змінної напруги. Такими параметрами є: амплітудне, середнє, середневипрямлене та середньоквадратичне значення:

- амплітудне (пікове) значення U_m - найбільше миттєве значення напруги $u(t)$ за час вимірювання T . Якщо сигнал несиметричний, то розрізняють додатне U_{max} (максимальне) і від'ємне U_{min} (мінімальне) значення;
- середнє значення - середнє за час вимірювання T значення напруги, яке визначається виразом

$$u_c = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Середнє значення, по суті, є постійною складовою сигналу за час T ;

- середневипрямлене значення - середнє за час вимірювання T значення модулю напруги

$$u_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt;$$

- середньоквадратичне значення - корінь квадратний із середнього за час вимірювання квадрата напруги:

$$u_{CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Квадрат середньоквадратичного значення напруги можна представити як значення середньої потужності, що розсіюється на опорі 1 Ом.

З спектрального представлення сигналів відомо, що квадрат середньоквадратичного значення періодичної напруги несинусоїдної форми дорівнює сумі квадратів середньоквадратичних значень всіх гармонік, включаючи сталу складову:

$$u_{CK}^2 = u_c^2 + u_1^2 + u_2^2 + \dots$$

Таким чином, середньоквадратичне значення гармонічної напруги не залежить від фазових співвідношень між гармонічними складовими.

Зв'язок між амплітудним, середнім, середневипрямленим і середньоквадратичним значеннями встановлюється через коефіцієнт амплітуди k_A і коефіцієнт форми k_F коливання.

Коефіцієнт амплітуди визначається відношенням амплітудного значення напруги до середньоквадратичного значення: $k_A = U_m / u_{CK}$.

Коефіцієнт форми визначається відношенням середньоквадратичного значення напруги до середньовипрямленого: $k_{\Phi} = u_{СК}/u_{СВ}$.

Значення коефіцієнтів задовольняють нерівності

$$1 \leq k_{\Phi} \leq k_A.$$

Знак рівності виконується для напруги постійного струму і прямокутної напруги форми «меандр». Значення коефіцієнтів k_A і k_{Φ} для різних найбільш уживаних коливань представлені в Табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Значення коефіцієнтів k_A і k_{Φ} для різних найбільш уживаних коливань

Форма	коефіцієнт	
	k_A	k_{Φ}
Синусоїда	1,41	1,1
На виході двонапівперіодного випрямляча	1,41	1,11
На виході однапівперіодного випрямляча	2	1,57
Пилкоподібна	1,73	1,16
Трикутна симетрична	1,73	1,16
Прямокутна (меандр)	1	1

9.3 ОСНОВНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛЬТМЕТРІВ

Основними метрологічними характеристиками вольтметрів є:

- ціна ділення рівномірної шкали або мінімальна ціна нерівномірного розподілу шкали;
- межі шкали приладу;
- вихідний код, число розрядів коду, номінальна ціна одиниці найменшого розряду коду індикаторного пристрою;
- межа припустимого значення середньоквадратичного відхилення випадкової складової основної похибки;
- межа припустимого значення додаткової похибки, обумовленої зовнішніми впливами;
- опір вхідних кіл вольтметра;

Основними експлуатаційними характеристиками вольтметрів є:

- засіб та параметри електроживлення;

- час встановлення робочого режиму і тривалість неперервної роботи.
- електрична міцність та опір ізоляції;
- стійкість до кліматичних і механічних впливів;
- габаритні розміри;
- надійність та безпечність експлуатації;
- комплектність приладу засобами приєднання.

9.4 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ

Для вимірювання сталої напруги використовується або метод безпосередньої оцінки, або методи порівняння, зокрема нульовий і диференціальний. Різні методики вимірювання напруги вимагають різних принципів побудови вольтметрів. Розрізняють вимірювальні прилади прямої дії і прилади порівняння. Узагальнені структурні схеми цих приладів представлені відповідно на Рис. 9.1 і 9.2, де прийняті наступні позначення: $ВП_1, ВП_2, \dots, ВП_n$ – вимірювальні перетворювачі; ІП – індикаторний (відліковий) пристрій; ПП – пристрій порівняння; ПКМ – пристрій керування мірою; КМ – керована міра.

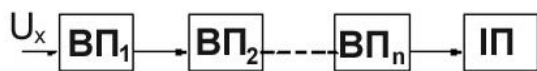


Рис. 9.1. Структурна схема вольтметра прямої дії

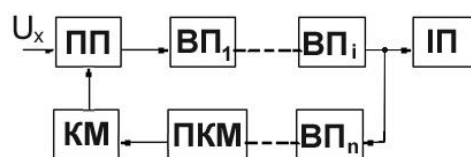


Рис. 9.2. Структурна схема вольтметра порівняння

Основною відмінністю поданих структурних схем є наявність у схемі приладу, що працює за методом порівняння (Рис. 3.3.2), кола зворотного зв'язку (КЗЗ). Структура таких приладів є замкненою, при цьому в КЗЗ повинна формуватися фізична величина, яка є однорідною з вимірюваною. В якості вимірювальних перетворювачів можуть застосовуватися подільники напруги, повторювачі напруги, підсилювальні схеми, перетворювачі середньовипрямлених, середньоквадратичних і амплітудних значень напруги, перетворювачі аналог – цифра і цифра – аналог тощо.

У приладах прямої дії оцінку значення вимірюваної величини визначають за допомогою ІП. Прилад попередньо градується за допомогою зразкових мір або зразкових вимірювальних приладів. У приладах порівняння виконується порівняння значень вимірюваної напруги і напруги, що відтворюється мірою, і домагаються їх рівності. За цієї умови вимірюваним

значенням вважається значення напруги міри. Таким чином, значення міри повинне мати можливість плавного керування. У вольтметрах порівняння що працюють за диференціальним методом, в загальному випадку, задача досягнення рівності значень вимірюваної напруги і напруги міри не ставиться. В цьому випадку прилад вимірює значення різниці цих напруг, а градування має в одиницях вимірюваної величини. Величина міри може бути постійною або змінюватися дискретно.

Поєднує обидві схеми вольтметрів наявність індикаторного пристрою, який, за будь-яких умов, є вимірювачем напруги сталого струму, на яку було перетворено напругу на вході вольтметра. Відлік може мати аналоговий або цифровий вигляд.

9.4.1 Аналогові вольтметри сталої напруги

Структурна схема аналогового вольтметра сталої напруги безпосередньої оцінки подана на Рис. 9.1, де вимірювальні перетворювачі переводять вимірювану величину в деяку проміжну, що керує вимірювальним механізмом ІІ. В якості вимірювального механізму можуть бути використані магнітоелектричні, електромагнітні або електростатичні механізми. У вольтметрах, використовуваних для радіовимірювань, застосовують, як правило, магнітоелектричні вимірювальні механізми (ВМ). Ці механізми мають високу чутливість (існують прилади з відхиленням стрілки на всю шкалу струмами 0,1 – 0,01 мкА). Клас точності магнітоелектричних приладів може бути не гірше 0,1, а в деяких випадках – і 0,05. Найпростішим вольтметром безпосередньої оцінки є прилад, що використовує магнітоелектричний ВМ, послідовно з'єднаний з додатковим резистором. Схему такого вольтметра на кілька меж вимірювання подано на рис. 3.3.3. Додаткові резистори необхідні для перетворення вимірюваної напруги в пропорційний струм, необхідний для роботи ВМ. Значення опорів R_i визначається за формулою вимірювання U_x

$$U_x = I_{BM}(R_i + R_{BM}),$$

де I_{BM} - струм відхилення ВМ, R_{BM} – опір ВМ, R_i – опір додаткового резистора. При заданих струмі повного відхилення I_{BMmax} і опорі ВМ R_{BM} підбирають значення опору додаткового резистора R_i , щоб забезпечити найбільше можливе відхилення стрілки ВМ. Вольтметри, побудовані за схемою Рис. 9.3, мають рівномірну шкалу, велику чутливість, досить високу точність і широкий діапазон вимірюваних величин (від мікрвольт до тисяч вольт).

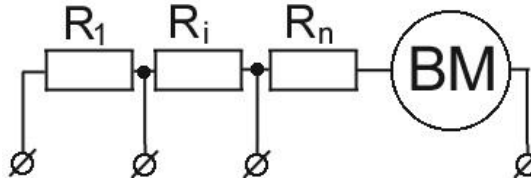


Рис. 9.3. Найпростіший вольтметр безпосередньої оцінки

Однак істотним недоліком подібних вольтметрів є їх низький вхідний опір, різний для різних значень вимірюваних напруг. Виміряне значення напруги U_x залежить не тільки від параметрів вольтметра, але й від внутрішнього опору джерела вимірюваної напруги $R_{ДЖ}$

$$U_x = U_{ДЖ} \frac{R_i + R_{ВМ}}{R_i + R_{ВМ} + R_{ДЖ}}$$

Похибка вимірювання не є суттєвою у разі $(R_i + R_{ВМ}) \gg R_{ДЖ}$, що має місце під час виконання вимірювань напруг джерел живлення або у високовольтних мережах. Але у разі радіовимірювань, де опори, на яких вимірюється напруга, мають великий розкид значень, вхідний опір вольтметра набуває вирішального значення.

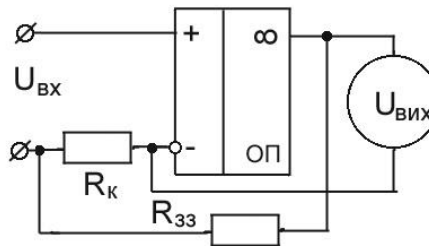


Рис. 9.4. Схема компенсаційного вольтметра

Великої чутливості і високої точності при великому вхідному опорі можна досягти в автокомпенсаційному вольтметрі. Структурну схему автокомпенсаційного вольтметра наведено на Рис. 9.4. Вона містить операційний підсилювач (ОП), охоплений колом від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ). Між балансними входами ОП прикладено напругу

$$U_k = U_{ВХ} - U_{ЗЗ},$$

де напруга ЗЗ дорівнює

$$U_{ЗЗ} = U_{ВУХ} \frac{R_k}{R_k + R_{ЗЗ}}$$

Вихідна напруга ОП з коефіцієнтом підсилення напруги K дорівнює

$$U_{ВУХ} = K \left(U_{ВХ} - U_{ВУХ} \frac{R_k}{R_k + R_{ЗЗ}} \right),$$

звідки напруга, виміряна на виході ОП, за умови, що $K \gg 1$, дорівнює

$$U_{BUX} = \frac{U_{BX}}{\frac{R_k}{R_k + R_{33}}} = U_{BX} \left(1 + \frac{R_{33}}{R_k} \right).$$

Як видно з виразу, виміряна напруга лінійно залежить від шуканої і відрізняється сталим коефіцієнтом, який може бути врахований під час калібрування шкали вольтметра. Перевагами автокомпенсаційних вольтметрів є їх великий вхідний опір, висока стабільність, залежна тільки від стабільності опорів резисторів R_k, R_{33} , та висока чутливість – $(1...10) \cdot 10^{-9}$ В. Точність вимірювання при цьому досягає $(0,5...1)\%$. Діапазон значень вимірюваних напруг обмежений діапазоном робочих напруг операційних підсилювачів.

Менші похибки вимірювання забезпечують вольтметри, що використовують метод порівняння, де значення вимірюваної напруги тим, чи іншим чином порівнюється з еталонною напругою. Такі прилади використовують під час повірки та атестації робочих вимірювальних приладів.

9.4.2 Цифрові вольтметри сталої напруги

Цифрові вольтметри автоматично виробляють дискретні сигнали вимірювальної інформації, що подають значення вимірюваної напруги в цифровій формі. Сучасні цифрові вольтметри мають високу точність, велику швидкодію, можливість використання в автоматичних системах і вимірювально-обчислювальних комплексах.

У цифрових вольтметрах використовуються ті ж методи вимірювання напруги, що і в аналогових вольтметрах. Формально структурна схема цифрового вольтметра відрізняється від відповідної структурної схеми аналогового вольтметра наявністю після вхідного пристрою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Відліковий пристрій є цифровим.

З великої кількості АЦП в цифрових вольтметрах знайшли застосування такі типи: перетворювач «напруга – часовий інтервал – цифровий код», час-імпульсний перетворювач інтегрувального типу, перетворювач «напруга – частота – цифровий код», АЦП порозрядного врівноваження. Вибір типу АЦП залежить від вимог до параметрів вольтметра та умов його експлуатації. Наприклад, при вимірюванні біопотенціалів на поверхні тіла людини, необхідно придушувати завади, що виникають від електромагнітних наведень від мережі живлення. Використовуючи вольтметр з перетворювачем інтегрувального типу, що вимірює середнє значення напруги за період інтегрування, який дорівнює періоду мережевої напруги, можна ефективно придушити цю заваду.

АЦП «напруга – часовий інтервал – цифровий код». Структурну схему і часові діаграми, що пояснюють принцип роботи, наведено на Рис. 9.5,а і б, відповідно. На схемі прийняті позначення: K_1 і K_2 – компаратори напруги, ГЛН – генератор лінійно змінюваної напруги, ФЧІ – формувач часового інтервалу, ЛІ – схема «логічне І», ГЕІ – генератор імпульсів еталонного періоду T_{EI} , ДЛ – двійковий лічильник імпульсів, ДШ – дешифратор, ЦІ – цифровий індикатор, БК – блок керування. АЦП працює наступним чином. Напруга з ГЛН подається на два компаратори, де порівнюється з нульовою напругою (початок інтервалу часу) і з вимірюваною напругою (кінець інтервалу часу). Імпульси початку і кінця відповідного інтервалу подаються на ФЧІ, що формує імпульс, тривалість $T_{ЧИ}$ якого пропорційна значенню вимірюваної напруги. Цей імпульс діє на одному вході схеми «логічне І», на другий вхід якої надходять імпульси з ГЕІ, які далі проходять на лічильник ДЛ в кількості $N = T_{ЧИ}/T_{EI}$, пропорційній значенню вимірюваної напруги. Ця кількість через ДШ формує цифровий відлік значення вимірюваної напруги. БК керує частотою вимірювань, рівнем порівняння напруг та розрядністю подання результату.

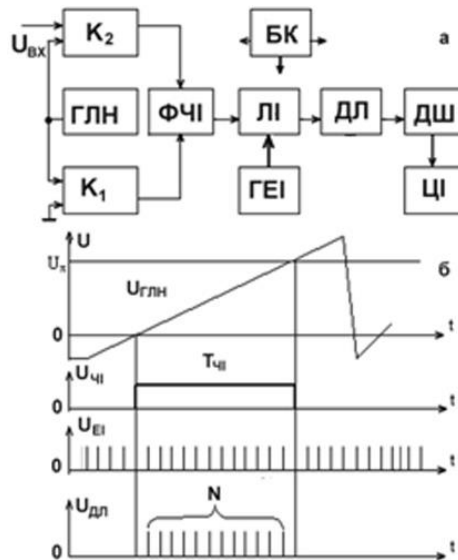


Рис. 9.5. Структура АЦП «напруга - часовий інтервал - код»

Основними складовими похибок у подібному АЦП є:

- непостійність кута нахилу і нелінійність напруги ГЛН ;
- похибка порівняння напруги U_x з лінійно змінною напругою;
- нестабільність частоти ГЕІ;
- похибка дискретності, викликана як несинхронністю початку вимірюваного інтервалу часу $T_{ЧИ}$ і початку появи еталонних імпульсів, так і, в загальному випадку, відсутністю кратності вимірюваного періоду та періоду еталонних імпульсів;
- вплив напруги завад на результат вимірювання.

Цифрові вольтметри, що використовують подібні АЦП, мають похибку (0,1...0,05)%. Перевагою таких АЦП є простота їх технічної реалізації. Ця перевага втрачається при підвищенні вимог до точності перетворювача в основному за рахунок ускладнення конструкції ГЛН.

Час-імпульсні АЦП інтегровального типу. Найбільше поширення отримали АЦП з подвійним інтегруванням. Структурну схему і часові діаграми, що пояснюють принцип роботи, наведено на Рис. 9.6,а і б, відповідно.

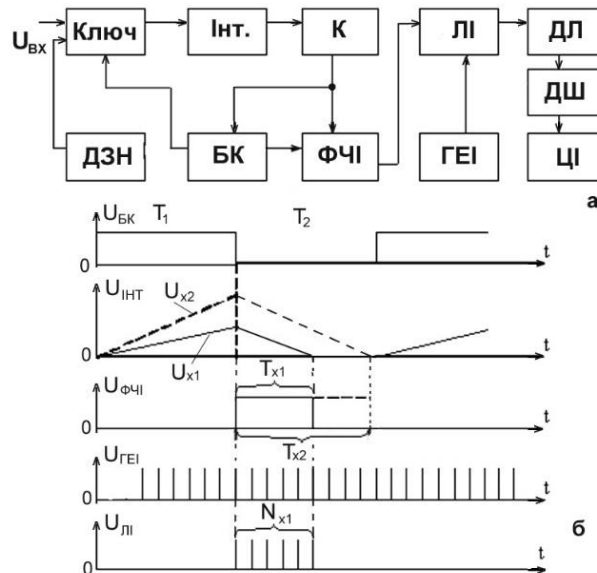


Рис. 9.6. Структура АЦП інтегровального типу

На схемі введено позначення Інт – інтегратор. Інші співпадають з Рис. 9.5. АЦП працює наступним чином. Блок керування формує послідовність прямокутних імпульсів з тривалістю T_1 і пауз тривалістю T_2 . У момент початку інтервалу T_1 Ключ, керований БК, підключає до інтегратора вимірювану напругу $U_{вх}$. Інтегрування здійснюється протягом часу T_1 . Напруга на виході інтегратора в момент закінчення часу T_1 має вигляд

$$U_{ІНТ1} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_1} U_{вх} dt = U_{вх} \frac{T_1}{\tau},$$

де τ – стала часу інтегратора.

На початку такту T_2 до інтегратора Ключем підключається ДЗН, яке формує зразкову напругу $U_{ЗН}$ зворотної полярності. У другому такті напруга на виході інтегратора має вигляд

$$U_{ІНТ2} = U_{вх} \frac{T_1}{\tau} - \frac{1}{\tau} \int_0^{T_x} U_{ЗН} dt.$$

Інтегрування зразкової напруги відбувається до моменту часу, коли напруга на виході інтегратора зрівняється з нулем, що фіксує компаратор К. Тобто, в цей момент

$$U_{\text{вх}} \frac{T_1}{\tau} - U_{\text{ЗН}} \frac{T_x}{\tau} = 0.$$

Тривалість другого такту інтегрування T_x пропорційна значенню вимірюваної напруги, тобто

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{ЗН}} \frac{T_x}{T_1} = AT_x,$$

де A – деякий постійний коефіцієнт. На Рис. 3.3.6,б показано два часових інтервали T_{x1}, T_{x2} , що відповідають різним значенням вимірюваної напруги $U_{\text{вх}1}, U_{\text{вх}2}$. Інтервал інтегрування T_1 формуються шляхом заповнення лічильника еталонними імпульсами до деякої величини N , яка, наприклад, дорівнює ємності лічильника. Тоді

$$T_1 = N\tau,$$

де τ - період еталонних імпульсів. Відповідно,

$$T_x = N_x\tau,$$

звідки

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{ЗН}} \frac{N_x\tau}{N\tau} = U_{\text{ЗН}} \frac{N_x}{N}.$$

Отриманий вираз показує, що результат вимірювання напруги не залежить від частоти генератора еталонних імпульсів та від сталої часу інтегратора. Це є одною з основних переваг перед АЦП з генератором лінійно змінювальної напруги. Іншою перевагою є підвищення завадостійкості за рахунок усереднення завад протягом часу інтегрування. Основними складовими похибки є:

- нестабільність зразкової напруги;
- короткочасна нестабільність частоти генератора еталонних імпульсів;
- похибка дискретності;
- похибка порівняння.

Похибка таких цифрових вольтметрів може досягати (0,02...0,005)%. Для зменшення рівня завад від мережі живлення використовують автоматичне підстроювання частоти ГЕІ для підтримання умови кратності періоду інтегрування до періоду завади (50 або 400 Гц).

АЦП з перетворенням напруги в частоту.

Незважаючи на порівняльну складність практичної реалізації, подібні АЦП використовуються в ряді цифрових вольтметрів, а також в додаткових блоках до електронно-лічильних частотомірів. Це дозволяє розширити можливості частотомірів і використовувати їх в якості вольтметрів. Структурну схему найчастіше використовуваного перетворювача наведено на Рис. 9.7.

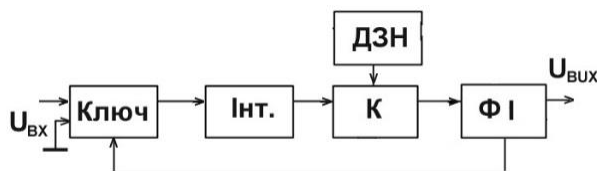


Рис. 9.7. Структурна схема перетворювача «напруга-частота»

Подібний перетворювач називають перетворювачем з імпульсним зворотним зв'язком. Перетворювач "напруга - частота" працює наступним чином. Перетворювана напруга $U_{ВХ}$ через Ключ подається на вхід інтегратора, вихідна напруга якого дорівнювала нулю за рахунок попереднього скидання. Вихідна напруга інтегратора змінюється за лінійним законом, покине досягне значення $U_{ЗН}$. Цей момент фіксується за допомогою компаратора К, до входів якого під'єднано вихід інтегратора і напруга $U_{ЗН}$ від ДЗН. Цю рівновагу можна описати виразом

$$U_{\text{ІНТ}}(T_1) = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_1} U_{\text{ВХ}} dt = U_{\text{ВХ}} \frac{T_1}{\tau} = U_{\text{ЗН}}.$$

В цей момент Ключ перемикається і швидко розряджає інтегратор, готуючи його до нового циклу інтегрування. При постійному значенні $U_{\text{ВХ}}$ ці операції виконуються періодично. Враховуючи, що $f = 1/T_1$, одержимо

$$U_{\text{ВХ}} = \frac{\tau}{T_1} U_{\text{ЗН}} = U_{\text{ЗН}} \tau f, \text{ або } f = A U_{\text{ВХ}}, \quad \text{де } A = \frac{1}{U_{\text{ЗН}} \tau}.$$

Таким чином, при відомих $U_{\text{ЗН}} \tau$ частота вихідного коливання f однозначно зв'язана з вимірюваною напругою. Основними складовими похибки перетворювача є нестабільність $U_{\text{ЗН}} \tau$ і похибка порівняння.

9.5 ПРИНЦИПИ ПОВУДОВИ ВОЛЬТМЕТРІВ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Для вимірювання параметрів змінної у часі напруги можуть бути використані методи, що застосовуються для вимірювання сталої напруги. Структурні схеми цифрових вольтметрів змінної напруги доповнені вимірювальними перетворювачами змінної напруги в сталу. Вимірювальні перетворювачі такого типу виконуються з використанням нелінійних властивостей напівпровідникових приладів, тому мають малу чутливість. Для компенсації малої чутливості окремих перетворювачів використовують вхідні підсилювачі. У вольтметрах змінного струму, що використовують метод

порівняння (повна або неповна компенсація), перед операцією компенсації зазвичай здійснюється перетворення змінної вимірюваної напруги в постійну. Це дозволяє застосовувати для компенсації постійну напругу, що дає певну перевагу, бо для безпосередньої компенсації вимірюваного змінної напруги з високою точністю необхідно мати змінну компенсуючу напругу аналогічної форми і враховувати можливі фазові зсуви між напругами. Це ускладнює прилад і істотно обмежує його можливості. Суттєвою особливістю вольтметрів змінної напруги є частотна залежність похибки вимірювання, обумовлена колами під'єднання вольтметра до точок вимірювання і його вхідного опору. Узагальнену схему під'єднання вольтметра до джерела напруги подано на Рис. 9.8.

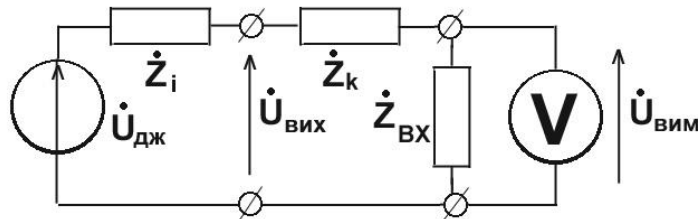


Рис. 9.8. Схема під'єднання вольтметра до джерела напруги

Тут \dot{Z}_i – внутрішній опір джерела вимірюваної напруги $\dot{U}_{дж}$, \dot{Z}_k – опір з'єднувального кабеля, $\dot{Z}_{вх}$ – вхідний опір вольтметра. Всі опори є комплексними, бо всі пристрої містять паразитні ємності та індуктивності. Напруга, прикладена до затискачів вольтметра, дорівнює

$$\dot{U}_{вим} = \dot{U}_{дж} \frac{\dot{Z}_{вх}}{\dot{Z}_{вх} + \dot{Z}_i + \dot{Z}_k}$$

Відносна похибка вимірювання напруги дорівнює

$$\delta_U = 1 - \frac{\dot{Z}_{вх}}{\dot{Z}_{вх} + \dot{Z}_i + \dot{Z}_k}$$

Частотна залежність похибки визначається довжиною і конструкцією кабеля, характером опорів джерела і вольтметра і може мати немонотонний (резонансний) характер. Все це обмежує робочий діапазон частот вольтметра.

Найбільше поширення на практиці мають електронні вольтметри. Електронні вольтметри безпосередньої оцінки зазвичай виконуються за однією з двох структурних схем. Перша схема містить послідовно з'єднані вхідний пристрій, підсилювач змінного струму, перетворювач змінної напруги в сталу, вимірювач сталої напруги. Друга схема складається з послідовно з'єднаних вхідного пристрою, перетворювача змінної напруги в сталу, підсилювача сталої напруги, вимірювача сталої напруги.

Вольтметри, що використовують першу структурну схему, мають високу чутливість, але порівняно вузький діапазон частот (2 Гц – 100 МГц).

Це пояснюється особливостями побудови ширококутових підсилювачів змінного струму. Вольтметри, побудовані за другою структурною схемою, відрізняються великим частотним діапазоном (20 Гц – 1000 МГц). Недоліком є менша чутливість, пов'язана з обмеженнями, що вносяться підсилювачем сталої напруги.

Частотний діапазон вольметра визначається не тільки амплітудно-частотними характеристиками вхідних кіл, але і особливостями перетворювачів. Застосовуються наступні перетворювачі або детектори: амплітудні (пікові), середньовипрямленого та середньоквадратичного значення. При цьому в силу конструктивних особливостей перетворювачів або особливостей вимірювання розрізняють перетворювачі з закритим або відкритим входом. При закритому вході в результаті вимірювання відсутня постійна складова вимірюваної напруги.

Перетворювачі амплітудних значень (амплітудний або піковий детектор) найбільш широко використовуються внаслідок простоти їх схемного рішення і ширококутовості. Складовими пікового детектора є діод і конденсатор. Принцип дії детектора заснований на швидкому заряді конденсатора до амплітудного значення вимірюваної напруги через діод з малим прямим опором і повільному розряді через вхідний опір вольметра. Детектори з відкритим і закритим входами відрізняються місцем ввімкнення вольметра – у першому вольметр підімкнено до конденсатора, у другому – до діода.

Амплітудні детектори з закритим і відкритим входами застосовуються в універсальних і високочастотних вольтметрах. Похибка вимірювання залежить від частоти вимірюваного коливання. Верхнє значення робочої частоти обмежене паразитними параметрами діода і конструкції вимірювальної голівки вольметра в цілому. Чутливість вольметра залежить від форми вольт-амперної характеристики (ВАХ) діода. Напруга відсікання струму, тобто напруга, при якій відкривається діод, має значення (0,3...0,7) В у діодів з *p-n* переходом. Тому в амплітудних детекторах використовують діоди з бар'єром Шотткі, які мають меншу напругу відсікання і меншу паразитну ємність. Типові параметри такого вольметра: частотний діапазон до 1 ГГц, перша межа вимірювання - 300 мВ, клас точності 1,5 – 2,0.

Перетворювачі середньовипрямлених значень мають таку ж схему, як амплітудні детектори, і відрізняються значеннями сталих часу заряду і розряду конденсатора. Завдяки підбору ємності конденсатора в усталеному режимі виділяється стала складова періодичної послідовності синусних імпульсів, одержаних на виході діода. Чутливість, як і у амплітудних детекторів пов'язана з формою ВАХ діода. Для підвищення чутливості використовують двонапівперіодні схеми перетворювачів, які використовують обидва напівперіоди синусного коливання для виділення сталої складової.

З метою підвищення чутливості і розширення динамічного діапазону на вході вольтметрів використовують широкосмугові підсилювачі напруги. В цьому випадку частотний діапазон роботи вольтметра залежить від смуги прозорості і нерівномірності коефіцієнту підсилення цього підсилювача.

Перетворювачі середньоквадратичних значень. Основним елементом перетворювача є елемент з квадратичною вольт-амперною характеристикою. Квадратичну залежність має початкова ділянка вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода. Однак напівпровідникові діоди відрізняються великим розкидом характеристик, квадратична ділянка яких має дуже малу протяжність. На практиці знайшли застосування елементи, побудовані на основі діодних ланцюжків, і термоперетворювачі.

Схеми з діодними ланцюжками – це, фактично, апаратна реалізація ідеї кусково-лінійної апроксимації квадратичної залежності. Нестабільність параметрів діодів у таких перетворювачах призводить до значних похибок перетворення (3 ÷ 5%). Частотний діапазон промислових зразків становить 30 Гц ... МГц.

Термоперетворювачі мають квадратичну функцію перетворення. Термоперетворювач включає в себе підігрівач і термочутливий елемент (термопару або терморезистор). Вхідна напруга подається на нагрівач. Виділене при цьому тепло перетворюється в термочутливому елементі, наприклад у термопарі, на термоерс, яка є пропорційною квадрату вимірюваної напруги. Недоліками таких перетворювачів є мала чутливість, велика інерційність, квадратичний характер шкали, низька електрична міцність. Для усунення цих недоліків використовують підсилювачі постійного струму, спеціальні методи лінеаризації шкали, від'ємний зворотний зв'язок. Частотний діапазон подібних перетворювачів - від декількох герців до сотень мегагерц.

Перетворювачі середнього значення. У такому перетворювачі використовуються інерційні властивості вхідних кіл і відлікового пристрою. У аналогових приладів це яскраво виражена інерційність стрілочного приладу. Таким чином, у певних межах вольтметр постійного струму можна використовувати в якості вольтметра змінного струму, що вимірює середнє значення напруги.

9.6 Питання для самоперевірки

1. Дайте визначення амплітудному, середньому, середньовипрямленому, середньоквадратичному значенням напруги.
2. Які співвідношення між різними значеннями напруги в залежності від його форми?
3. З яких причин може виникати систематична похибка під час вимірювання напруги складної форми?
4. У чому перевага компенсаційного методу вимірювання напруги?

5. Чим відрізняються вольтметри сталої і змінної напруги?
6. Порівняйте види АЦП для вимірювання напруги.
7. Які вимоги щодо підімкнення вольтметра до вимірюваного кола?

10. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

10.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Потужність є важливою характеристикою електричного сигналу, тому процедура вимірювання потужності займає значне місце в сучасній вимірювальній техніці. Вимірювання потужності широко застосовувалося при визначенні параметрів сигналів надвисоких частот (НВЧ), в той час, як подібне вимірювання на низьких та високих частотах проводилося досить рідко, за винятком вимірювання електричної потужності промислової частоти (50 Гц та 400 Гц). Крім того, широке застосування ймовірнісних методів у багатьох областях призвело до необхідності вимірювання середньої потужності випадкових процесів. Прилади для вимірювання потужності електричних сигналів називаються ватметрами.

Відомо, що протікання струму в електричному колі супроводжується споживанням енергії від джерела сигналу, швидкість надходження якої визначається потужністю. Розрізняють миттєву, середню, активну, реактивну і повну потужності.

Під миттєвою потужністю розуміють добуток миттєвого значення напруги на елементі кола на миттєве значення струму у ньому

$$p(t) = u(t)i(t).$$

Середня потужність періодичного коливання - це середнє значення миттєвої потужності за період T

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt.$$

Якщо струм і напруга мають синусну форму

$$i(t) = I_m \sin \omega t, \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

середня потужність дорівнює

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi.$$

Для періодичного коливання складної форми потужність можна визначити, скориставшись перетворенням Фур'є

$$\begin{aligned} P &= I_0 U_0 + \frac{1}{2} (I_{m1} U_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} U_{m2} \cos \varphi_2 + \dots) = \\ &= I_0 U_0 + I_1 U_1 \cos \varphi_1 + I_2 U_2 \cos \varphi_2 + \dots, \end{aligned}$$

де I_0, U_0 – сталі складові струму і напруги;

$I_n = I_{nm}/\sqrt{2}, U_n = U_{nm}/\sqrt{2}$ - дієві значення гармонік струму і напруги;
 φ_n - фазовий зсув між струмами і напругами гармонік.

Активна потужність являє собою енергію, яка виділяється (поглинається) в одиницю часу на активному опорі R у вигляді тепла, механічної роботи тощо $P = I^2R$. Активна потужність вимірюється у ватах.

Під реактивною потужністю розуміється величина $Q = UI\sin\varphi$. Реактивну потужність прийнято вимірювати у вольт-амперах реактивних (вар). Реактивна потужність характеризує собою ту частину енергії, якою обмінюються між собою джерело коливання і споживач.

Повна потужність визначається виразом $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ і вимірюється у вольт-амперах.

У колах сталого і змінного струму низької частоти вимірювання потужності проводиться зазвичай непрямыми методами за результатами прямих вимірів струму, напруги і зсуву фаз між ними. На частотах вище (30...50) МГц застосовуються методи вимірювання, засновані на перетворенні енергії електромагнітного поля в інші види енергії, більш зручні для вимірювання.

10.2 Вимірювання потужності в діапазонах низьких і високих частот

Зазвичай вимірюють середню потужність періодичного електричного коливання. Всі методи вимірювання можна розділити на дві основні групи. До першої групи відносять методи з перетворенням електричної енергії в теплову енергію. Перетворювачі першої групи будуються за тим же принципами, що і аналогічні перетворювачі електронних вольтметрів. До другої групи відносять методи вимірювання, засновані на виконанні обчислювальних операцій у відповідності з математичним визначенням середньої потужності (методи множення). Застосовуються пристрої прямого і непрямого множення.

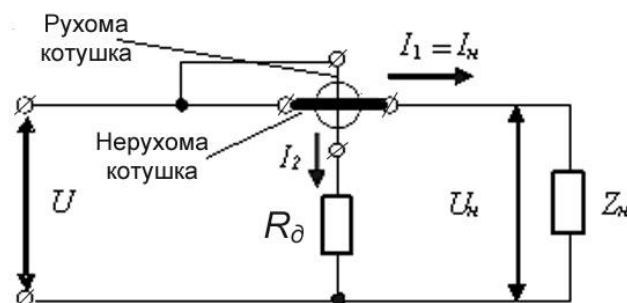


Рис. 10.1. Схема підімкнення електродинамічного ватметра

Ватметри електродинамічної системи - ці електромеханічні прилади відносяться до другої групи і використовуються на частотах до 10 кГц. У них пристроями прямого множення є вимірювальні механізми. Схему ввімкнення такого ватметра наведено на Рис. 10.1. Принцип дії ґрунтується на взаємодії

магнітних полів двох котушок – нерухомої з малою кількістю витків товстого дроту, яка вмикається послідовно з опором навантаження, і рухомої з великою кількістю витків, яка вмикається паралельно навантаженню і з якою з'єднано стрілку індикатора. Кут повороту стрілки ватметра \propto буде прямо пропорційний добутку струмів у котушках і, відповідно, активній потужності в навантаженні

$$\alpha = kUI_H = kP,$$

де k – коефіцієнт пропорційності, залежний від додаткового опору R_d та конструкції котушок, визначається під час градування шкали ватметра за допомогою зразкового приладу.

Ватметри електродинамічної системи можуть застосовуватися для вимірювання електричної потужності в колах як сталого, так і змінного струму низької частоти. Однак найбільш широко вони використовуються для вимірювання потужності в електричних мережах промислової частоти 50 Гц, та в електричних колах рухомих об'єктів з частотою 400 Гц.

Середню потужність, споживану колом змінного струму можна знайти, помножуючи миттєві значення напруги та струму з подальшим усередненням добутку. Така задача розв'язується за допомогою аналого-цифрових мікроконтролерів. Структурну схему ватметра з використанням цифрового множення наведено на Рис. 10.2.

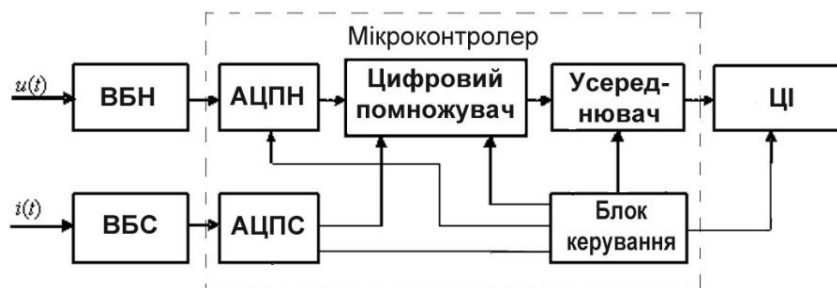


Рис. 10.2. Структурна схема ватметра з цифровим множенням

Операції множення та усереднення виконуються мікроконтролером, що містить аналого-цифрові перетворювачі напруги і струму (АЦПН та АЦПС). Входи АЦПН та АЦПС під'єднані до входних блоків напруги і струму (ВБН та ВБС), які є опорами, ввімкненими у кола вимірювання напруги і струму. Миттєві значення напруги і струму перетворюються в цифрові коди, які перемножуються і усереднюються за керувальною програмою мікроконтролера. Результат обчислення відображається на цифровому індикаторі Ці. Верхня частота вимірюваного коливання залежить від швидкодії мікроконтролера і, у разі використання сигнальних процесорів, може складати одиниці мегагерц. Похибки в основному залежать від впливу вхідних блоків на коло, в якому вимірюється потужність.

Вимірювання потужності в діапазоні НВЧ є одним з найбільш поширених і важливих видів вимірювань. Це пояснюється тим, що в радіотехнічних пристроях цього діапазону потужності сигналів змінюються в дуже широких межах. На відміну від вимірювання потужності на низьких і високих частотах, всі методи вимірювання потужності на НВЧ засновані на еквівалентному перетворенні енергії електромагнітних коливань в інші види енергії, більш зручні для вимірювання \square - теплову, механічну тощо, з наступним вторинним перетворенням в електричний сигнал. Непрямі методи вимірювань практично не знаходять застосування у зв'язку з тим, що при ввімкненні вимірювального приладу в тракт поширення сигналу істотно змінюється режим його роботи.

Ватметри НВЧ зазвичай класифікують за способом ввімкнення їх у вимірювальний тракт. При цьому розрізняють ватметри прохідної потужності (Рис. 10.3,а) і ватметри потужності, що поглинається (Рис. 10.3,б). Фактично ватметри поглинального типу застосовуються для вимірювання вихідної потужності генераторів коливань, що працюють на узгоджене навантаження, і вимагають відключення споживача енергії. Ватметри прохідної потужності застосовуються для неперервного контролю рівня потужності, що надходить від джерела до навантаження, під час експлуатації радіотехнічних передавальних пристроїв. Перетворювачі ватметрів прохідної потужності включають в лінію передачі електромагнітної енергії безпосередньо або через спрямовані відгалужувачі.



Рис. 10.3. Блок-схема вимірювання потужності НВЧ

Залежно від способу перетворення електромагнітної енергії ватметри бувають теплові, пндеромоторні і електронні.

Згідно з вимірюваним параметром – ватметри середнього значення потужності і ватметри імпульсної потужності.

В залежності від конструкції передавального тракту – ватметри з коаксійним, смужковим або хвилеводним входом.

У відповідності до рівня вимірюваної потужності – ватметри низької (до 10 мВт), середньої (10мВт... 10 Вт), великої (понад 10 Вт) потужності.

Найпоширенішими є теплові методи вимірювання, засновані на перетворенні потужності електромагнітних коливань НВЧ в теплову потужність, з подальшим перетворенням в електричний сигнал:

- терморезистивний метод;
- термоелектричний метод;
- калориметричний метод.

Терморезистивний метод вимірювання потужності ґрунтується на вимірюванні зміни активного опору терморезистора при розсіюванні в ньому електромагнітної енергії і є одним з найпоширеніших методів вимірювання малих потужностей. В якості термозалежних резисторів використовують термістори і болометри.

Термістор – це напівпровідниковий терморезистор, опір якого залежить від температури і, отже, від потужності НВЧ коливання, що розсіюється на ньому і викликає нагрівання. Термістор має від’ємний температурний коефіцієнт опору і два типи конструктивного виконання – стрижневий і намистинковий. Стрижневі термістори мають менший реактивний опір, а намистинкові мають більшу чутливість внаслідок меншої поверхні охолодження. Термістори мають чутливість, що лежить в межах (10...100) Ом/мВт. Для підвищення чутливості робочу точку на характеристиці перетворення розташовують на ділянці максимальної крутості. Для цього використовують додаткове підігрівання термістота від керованого джерела сталого або низькочастотного струму.

Болометр – це дротяний або плівковий терморезистор, розташований в скляному балоні, відкачаному до вакууму або наповненому інертним газом. Активний опір плівкового болометра практично не залежить від частоти до надвисоких частот. Плівковий болометр, розміри і форма якого можуть бути підібрані, легко встановити в НВЧ тракті без помітного порушення його однорідності, що дозволяє конструювати широкосмугові вимірювальні елементи. Він мало чутливий до перевантажень, припустима потужність розсіювання складає кілька Вт. Однак плівкові болометри мають меншу чутливість, ніж термістори – вони застосовуються для вимірювання потужностей до 1 Вт.

Ватметр для поглинального вимірювання потужності НВЧ коливань складається з двох основних частин – термісторного або болометричного вимірювального перетворювача (голівки) і вимірювальної схеми. У середині голівки, яка є відрізком коаксійної лінії або хвилеводу, встановлено терморезистор (термістор або болометр). У відповідному режимі, який визначається значенням струму через терморезистор, він є узгодженим навантаженням для НВЧ тракту (що необхідно для повного поглинання вимірюваної потужності), на кінці якого включена голівка. Зміна опору терморезистора під дією НВЧ потужності вимірюється за допомогою мостових схем. Неврівноважені мости, застосовувані для створення ватметрів прямої дії, мають нижчу точність, ніж врівноважені, застосовувані в ваттметрах, заснованих на методі порівняння. Перевагою неуврівноважених мостів є наочність індикації результатів вимірювань.

На Рис. 10.4 наведено варіант спрощеної схеми врівноваженого мосту з терморезистором, в якому вимірювана потужність НВЧ порівнюється з каліброваною потужністю сталого струму.

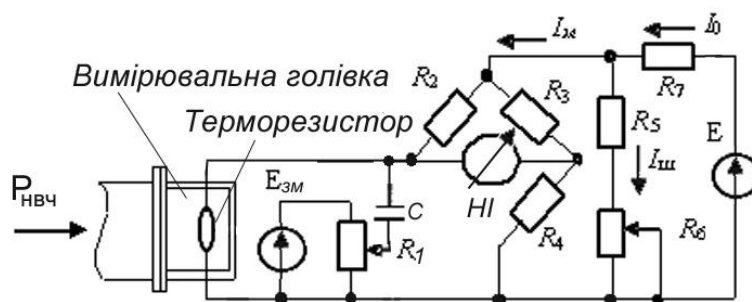


Рис. 10.4. Схема врівноваженого мосту з терморезистором

Терморезистор з опором R_{10} , встановлений у вимірювальній голівці, включається в одне з плечей мосту. В інші плечі мосту включаються резистори R_2 , R_3 , R_4 , які дорівнюють опорі R_{10} в робочій точці. Постійна напруга живлення моста E подається через резистор R_7 , що має великий опір, внаслідок чого через нього протікає досить малий струм живлення мосту I_0 . Паралельно мосту включений дільник з опорів R_5 , R_6 . Через резистор R_6 , включений реостатом, з повзуном якого пов'язана вимірювальна шкала, протікає струм, значення якого фіксується на шкалі повзуна. Від опору цього резистора залежить струм I_{R_6} , що протікає через терморезистор. До подачі потужності НВЧ міст збалансований за рахунок двох джерел живлення - постійного струму E і змінного струму $E_{зм}$. При цьому опір R_6 має бути максимальним, якщо використовується термістор, або мінімальним - при використанні болометра.

При надходженні НВЧ коливань, внаслідок зміни опору терморезистора R_t , баланс мосту порушується, і його відновлюють, змінюючи струм живлення мосту, отже, і опору терморезистора за допомогою опору R_6 . Баланс спостерігається за допомогою нуль-індикатора НІ, ввімкненого в діагональ мосту. Для термісторів потрібно зменшувати опір R_6 , для болометрів - збільшувати його. Шкала резистора R_6 градується безпосередньо в ватах. Початкове балансування мосту змінною напругою генератора $E_{зм}$ дає можливість виключити вплив навколишнього середовища і зберегти градування ватметра при старінні терморезисторів і їх заміні.

Наведена схема демонструє принципову можливість вимірювання потужності НВЧ шляхом вимірювання значення компенсуючої сталої напруги і застосовувалась у минулі часи. В наш час усі функції калібрування, балансування мосту і відліку сталої напруги можна виконати за допомогою мікроконтролера, оснащеного АЦП і ЦАП.

Похибки терморезистивних ватметрів. До основних похибок терморезисторних ватметрів відносять наступні:

1. Похибка міри. Якщо в ватметрі потужність НВЧ коливань порівнюється з потужністю постійного струму, то мірою є джерело сталого струму, отже, похибка міри визначається нестабільністю струму, нелінійністю шкали опору R_6 тощо.
2. Похибка перетворення. Основні причини появи таких похибок наступні:
 - недосконале узгодження опору голівки з хвильовим опором тракту, що викликає появу систематичної похибки, яку в принципі можна визначити і врахувати (суттєві ускладнення виникають у разі роботи в діапазоні частот);
 - нестабільні контакти між терморезистором і голівкою, а також голівкою і трактом.
3. Похибка порівняння. Значення цієї похибки залежить від чутливості НІ, характеристики терморезистора, точності підтримання робочого опору терморезистора, температури навколишнього середовища тощо.
4. Похибка фіксації результатів вимірювань. Вона залежить в основному від точності градування шкали вимірювача.

Термоелектричний метод вимірювання потужності заснований на вимірюванні значення термоЕРС, що виникає при нагріванні термоперетворювача енергією НВЧ коливань. Ватметри, що реалізують такий метод вимірювання потужності, характеризуються широким діапазоном частот і великим динамічним діапазоном. Ватметр, як і у попередньому методі, складається з НВЧ голівки з термоперетворювачем та вимірювальної частини сталого струму.

Основним елементом перетворювача є блок диференціальних високочастотних термопар, що виконують функції узгодженого навантаження і диференціального термометра. Найчастіше застосовуються термопари у вигляді металевих плівок, напилених на підкладку з діелектричного матеріалу з малими втратами. Застосування змінних голівок з такими термоперетворювачами дозволяє вимірювати потужність одним приладом в широкому діапазоні частот, наприклад, від 30 до 140 ГГц. Основним елементом вимірювальної частини є цифровий вольтметр сталої напруги.

Переваги таких ватметрів – мала залежність від температури навколишнього середовища і малий час підготовки приладу до роботи. Недолік – обмежений верхній рівень потужності і недостатня стійкість до перевантажень, що обмежує припустиме значення середньої потужності при вимірюванні імпульсних сигналів. Верхній рівень вимірюваної потужності підвищують, включаючи перед голівкою калібрований атенуатор, який може бути з фіксованим або змінним коефіцієнтом ослаблення сигналу. Джерела похибок – ті ж самі, що й у терморезистивних ватметрів.

Калориметричний метод вимірювання потужності заснований на визначенні кількості тепла, що розсіюється у навантаженні, що є

поглинальним опором в лінії передачі НВЧ потужності. Термодинамічний стан калориметричного навантаження можна описати рівнянням

$$P_H = H(T - T_{сер}) + Cm \frac{dT}{dt},$$

де P_H – потужність, що розсіюється в калориметричному навантаженні; T ($T_{сер}$) – температура (початкова температура) середовища, в якій знаходиться навантаження; H – коефіцієнт тепловіддачі; C – питома теплоємність навантаження; m – маса навантаження.

Перший доданок цього рівняння характеризує розсіювання тепла, обумовлене теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням. Другий доданок визначає збільшення температури калориметричного навантаження під дією потужності НВЧ, що розсіюється в ньому. Різницю температур можна визначити за формулою

$$T - T_{сер} = \frac{P_H}{H} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

де $\tau = \frac{Cm}{H}$ – теплова постійна часу вимірювальної голівки.

Для будь-якого калориметра за результатами вимірювання різниці температур $T - T_{сер}$ можна обчислити потужність, що поглинається, якщо відомі фізичні постійні (H , C , m) в рівнянні. На практиці визначення постійних утруднено, тому використовують два граничних режими роботи калориметра, і, відповідно, дві формули, що впливають з рівняння для цих режимів

$$P_H = Cm \frac{dT}{dt}, \text{ при } t \rightarrow 0,$$

$$P_H = H(T - T_{сер}), \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

З першого співвідношення випливає, що час вимірювання повинен бути значно менше τ . Втрати тепла в навколишнє середовище повинні бути малі і обов'язково враховані в процесі вимірювання. Такі калориметри називаються адіабатичними, їх перевагою є те, що для визначення потужності достатньо знати тільки теплоємність навантаження і швидкість зміни температури (dT/dt). Потужність P , усереднена за час Δt , визначається виразом

$$P_H = kmC\Delta t,$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

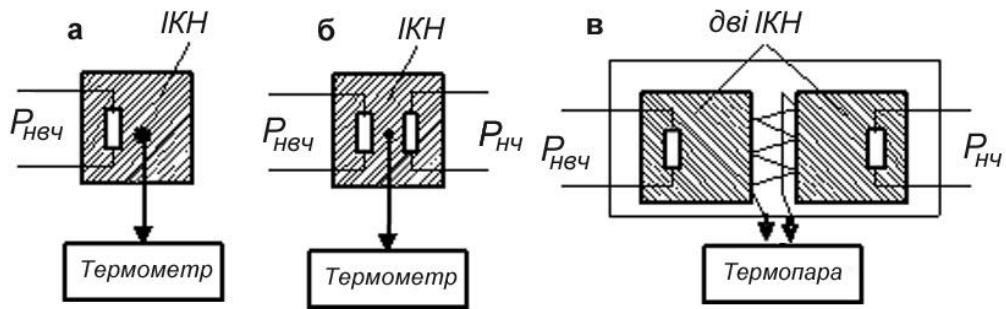


Рис. 10.5. Спрощені схеми адиабатичних калориметрів

Спрощені схеми основних типів адиабатичних калориметрів наведено на Рис. 10.5, а,б, в, де а – адиабатичний калориметр, б – адиабатичний калориметр з калібруванням термометра відомою потужністю, в – диференціальний адиабатичний калориметр. На Рис. 10.5 ІКН – ізольоване калориметричне навантаження. Недоліками найпростішої схеми, поданої на Рис. 10.5, а є мала чутливість і нелінійність шкали потужностей, залежність від якості термоізоляції. Деякі недоліки цієї схеми усуваються, якщо використати метод заміщення. В цьому випадку для калібрування термометра використовується відома потужність постійного струму або струму НЧ, що вводиться з допомогою додаткового нагрівача (Рис. 10.5, б), і, отже, вимоги до теплоізоляції калориметричного навантаження значно знижуються, а потреба в знанні теплоємності і маси перетворювача виключається. Метод заміщення також використовується в диференціальному калориметрі (Рис. 10.5, в), в якому застосовуються два однакові ІКН. Одне з них поглинає вимірювану потужність, а інше є датчиком опорної температури. Вимірювання потужності полягає у вимірюванні різниці температур між двома навантаженнями. Теплова симетрія системи значно знижує вплив температури навколишнього середовища і підвищує чутливість калориметричного методу вимірювання потужності НВЧ. Основний недолік адиабатичних калориметрів – необхідність періодичного відключення потужності НВЧ від корисного навантаження.

Подібного недоліку позбавлені так звані проточні калориметри, основними елементами яких є калориметричне навантаження для перетворення електромагнітної енергії НВЧ в теплову енергію рідини (зазвичай води), пристрій для циркуляції рідини і вимірювач температури (Рис. 10.6). Залежність вимірюваної потужності від швидкості поглинання енергії визначається рівністю

$$P = 4,187GCD\Delta T,$$

де G – щільність рідини; C – питома теплоємність рідини; D – витрата рідини; ΔT – різниця температур. Тобто, за умови сталих значень усіх параметрів, потужність є пропорційною різниці температур потоку рідини, що надходить у калориметр і витікає з нього. Калориметричні навантаження проточних

калориметрів в залежності від діапазону частот і умов узгодження з передавальним трактом мають різні конструкції, основне завдання яких – це створення умов узгодження у якомога ширшому діапазоні частот.

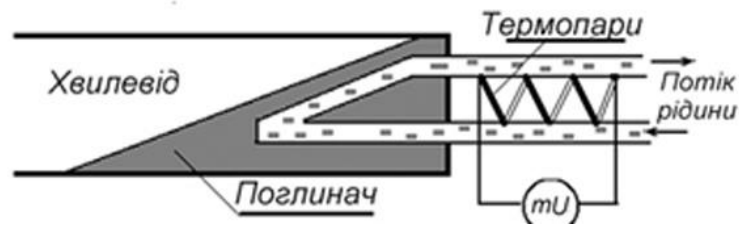


Рис. 10.6. Схема проточного калориметра

Калориметричний метод вимірювання потужності НВЧ є найточнішим. Похибки зразкових калориметрів складають близько 1%, а промислові калориметри мають похибку 2,5...5%.

10.3 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що таке потужність електричного коливання?
2. Види потужностей в електричному колі.
3. Від чого залежить активна потужність синусного коливання?
4. Поясніть принцип дії електродинамічного ватметра.
5. Поясніть роботу вимірювача потужності, що використовує метод множення.
6. Сформулюйте вимоги до ватметрів в залежності від діапазону робочих частот.
7. Які вимірювальні перетворювачі використовуються у ватметрах різних діапазонів частот?

11 ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ

11.1 ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

Розв'язання багатьох задач радіоелектроніки є неможливим без вимірювання поряд з амплітудою і частотою також фазового зсуву коливань. Фазові методи вимірювань дозволяють вирішувати багато завдань, пов'язаних з визначенням просторових координат об'єктів, завадостійким передаванням інформації тощо.

Фазовим зсувом (ФЗ) φ називається модуль різниці двох аргументів гармонічних коливань з однаковою частотою ω_0

$$\begin{aligned} U_1(t) &= U_{1m} \cos(\omega_0 t + \varphi_1), \\ U_2(t) &= U_{2m} \cos(\omega_0 t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (11.1)$$

У відповідності з наведеним визначенням ФЗ коливань

$$\varphi = |\varphi_2 - \varphi_1| = \omega_0 \Delta T = 2\pi \frac{\Delta T}{T}, \quad (11.2)$$

де ΔT - інтервал часу між моментами, коли коливання знаходяться в однакових фазах, наприклад, при переходах через нуль від від'ємного до додатного значення (Рис. 11.1). З використанням градусної міри

$$\varphi^0 = 360^0 \frac{\Delta T}{T}. \quad (3.3.5)$$

Фазовий зсув є сталою величиною і не залежить від моменту вимірювання.

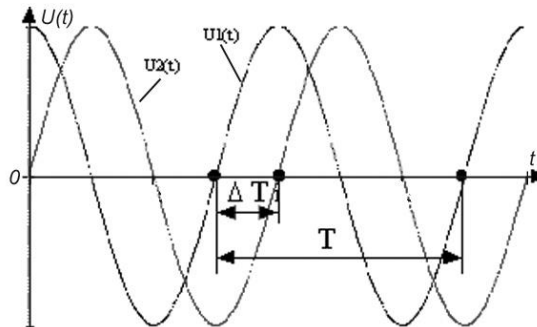


Рис. 11.1. Визначення фазового зсуву

Для негармонічних сигналів замість ФЗ використовують час затримки ΔT між заздалегідь обумовленими рівнями коливань.

Прилади, що вимірюють ФЗ називають фазометрами. За схемою побудови розрізняють аналогові та цифрові фазометри.

Розрізняють наступні методи визначення різниці фаз: осцилографічні, компенсаційні, тригерні та кореляційні. Крім того, розроблено оптимальні алгоритми оцінки ФЗ в умовах дії на вимірюваний сигнал шумових завад.

11.2 ОСЦИЛОГРАФІЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

В залежності від виду розгортки осцилографа розрізняють три методи вимірювань ФЗ: лінійної, синусної та кругової розгортки.

Метод лінійної розгортки. Осцилограф має бути двопроменевим або двоканальним з комутацією вхідних коливань. В канал вертикального відхилення осцилографа подають напруги за виразом (3.1.5). Генератор розгортки осцилографа включений. Змінюючи частоту розгортки, досягають стійкого зображення на екрані двох синусних коливань, як на Рис. 3.5.1. На горизонтальній шкалі осцилографа вимірюють значення T і ΔT . Розраховують ФЗ за формулою (3.3.5). Похибка вимірювання визначається неточністю вимірювання відрізків T і ΔT , нелінійністю розгортки, впливом фазових характеристик каналів. Сумарна відносна похибка вимірювання не перевищує 5%.

Метод синусної розгортки. Одне з досліджуваних коливань подається на вхід вертикального відхилення осцилографа, друге – на вхід горизонтального відхилення. Можна показати, що на екрані з'явиться найпростіша фігура Лісажу – еліпс, нахил якого відносно осей залежить від ФЗ між коливаннями і чутливості каналів (Рис. 11.2,а).

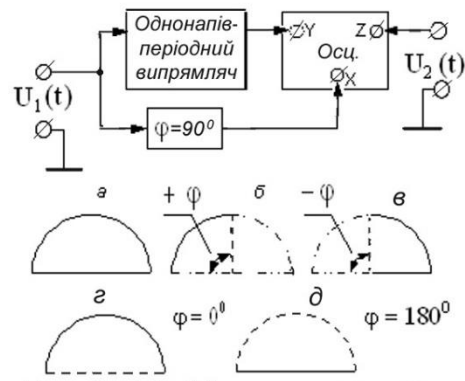
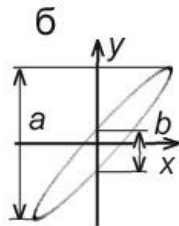
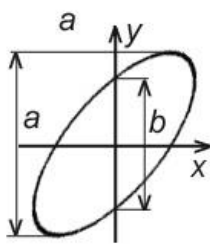


Рис. 11.2. Метод синусної розгортки Рис. 11.3. Метод кругової розгортки

Розрахунок фази виконується за формулою

$$\varphi = \arcsin \frac{b}{a}.$$

Похибка вимірювання визначається неточністю вимірювання відрізків a і b , впливом фазових характеристик каналів. Для перевірки різниці фаз каналів необхідно подати одне коливання на обидва входи осцилографа. У разі $\varphi_x = \varphi_y$ на екрані буде пряма лінія ($b = 0$), нахил якої залежить від чутливостей каналів (Рис. 11.2,б). Якщо на екрані буде еліпс, слід розрахувати різницю фаз каналів за попередньою формулою

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{b_0}{a_0}$$

і визначити істинний ФЗ $\varphi_i = \arcsin \frac{b}{a} - \arcsin \frac{b_0}{a_0}$.

Метод колової розгортки дозволяє виконувати вимірювання ФЗ в межах $\pm 180^\circ$ із зазначенням знаку. На Рис. 3.5.3 представлені схеми подачі напруги на входи осцилографа і зображення на його екрані для різноманітних випадків: *a* - за відсутності напруги $U_2(t)$; *b* - при додатному значенні φ ; *в* - при від'ємному значенні φ ; *г* - при синфазних коливаннях; *д* - при протифазних коливаннях. Даний спосіб є більш точним, ніж метод синусної розгортки, але дає прямий відлік фазового кута із зазначенням знаку.

11.3 КОМПЕНСАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

Компенсаційні методи вимірювання полягають у компенсації значення ФЗ між напругами і відліку значення компенсатора. Для компенсації застосовують градуйований фазообертач і індикатор нуля ФЗ. Результат вимірювання ФЗ зчитують зі шкали градуйованого фазообертача. В якості індикатора нульового ФЗ між напругами може бути застосований, наприклад, осцилограф в режимі синусної розгортки (Рис. 11.2). Основний недолік методу – складність створення фазообертачів, що працюють в діапазоні частот. Тому застосовують схеми з подвійним перетворенням частоти (Рис. 11.4), в яких фазообертач працює на фіксованій частоті, а налаштування на частоту вимірюваного коливання відбувається за допомогою гетеродина із змінною частотою. Одне з коливань подається в канал керування фази, що складається з двох змішувачів ЗМ, гетеродина Γ із змінною частотою, смугового СФ та низькочастотного ФНЧ фільтрів і керованого фазообертача ФО з градуйованою шкалою. Змінюючи частоту Γ , канал налаштовують на частоту вхідного коливання, переносячи його на фіксовану частоту (на частіше, вищу за частоту вхідного коливання), на якій відбувається зміна фази. Завдяки застосуванню одного гетеродина, коливання із зміненою фазою на виході другого змішувача, має частоту вхідних коливань. Фази коливань порівнюються на нуль-індикаторі НІ. Значення ФЗ зчитується з шкали фазообертача після досягнення нульового відліку НІ. Для калібрування фазометра на обидва його входи подається одне коливання і враховується фазовий зсув, який вноситься каналом керування фази. Фазометри за схемою Рис. 11.4 працюють в діапазоні до сотень мегагерц з абсолютною похибкою $(1...3)^\circ$.

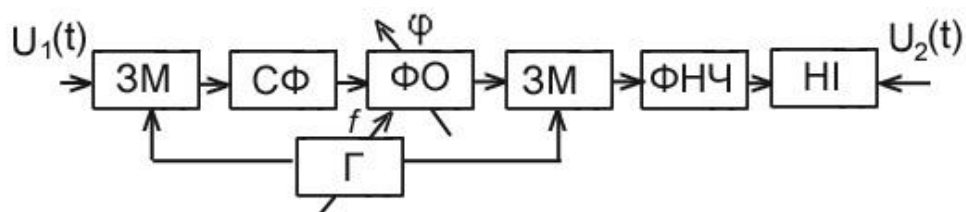


Рис. 11.4. Структурна схема компенсаційного фазометра

11.4 ТРИГЕРНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ

Тригерний метод полягає у формуванні періодичної послідовності прямокутних імпульсів, період яких дорівнює періоду вхідних коливань, а тривалість пропорційна ФЗ між ними. Тобто ФЗ є пропорційним шпаруватості сформованої послідовності

$$\varphi^0 = \frac{\Delta T}{T} 360^0,$$

де ΔT і T визначені на Рис. 11.1. З цією метою з вхідних напруг формуються послідовності коротких імпульсів, час виникнення яких співпадає із заданими значеннями вхідних коливань (найчастіше – це переходи коливань через нуль). Ці імпульси запускають і скидають тригери, на виходах яких і формуються шукані послідовності.

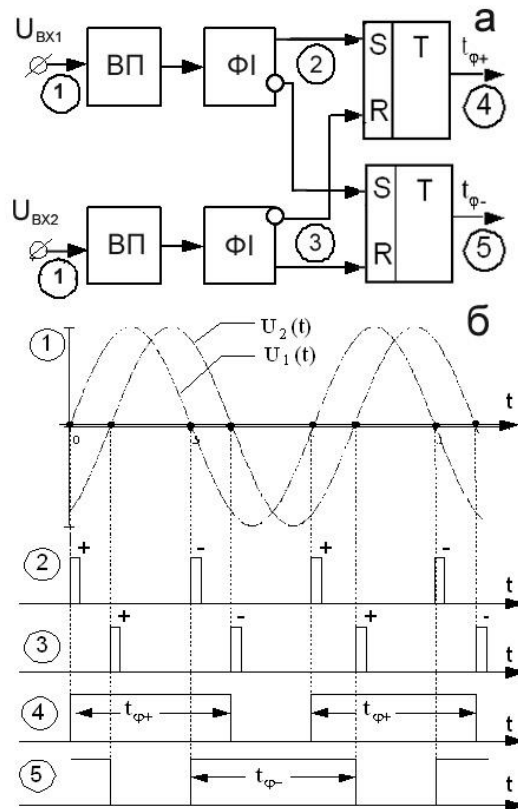


Рис. 11.5. Двонапівперіодний тригерний фазометр

Схему двонапівперіодного тригерного фазометра наведено на Рис. 11.5,а, а часові діаграми напруг у різних точках схеми – на Рис. 11.5,б. Вимірюваний ФЗ дорівнює

$$\varphi^0 = \frac{t_{\varphi+}}{T} 360^0 - 180^0 = \frac{t_{\varphi-}}{T} 360^0 - 180^0,$$

де $t_{\varphi+}$ і $t_{\varphi-}$ зрозумілі з розгляду Рис. 5.5,б.

Для зменшення похибок зазвичай беруть середнє значення цих інтервалів часу

$$t_{\varphi} = \frac{t_{\varphi+} + t_{\varphi-}}{2},$$

тоді результат вимірювання ФС буде дорівнювати

$$\varphi^0 = \frac{t_{\varphi}}{T} 360^0 - 180^0.$$

Дана схема не має обмежень щодо вимірювання малих ФЗ, пов'язаних з «мертвою зоною» тригера і впливу зміни «нульової лінії» вхідних коливань на похибку вимірювання. Верхня частота вимірюваних коливань обмежена швидкодією тригерів. Фазометри такого типу дозволяють проводити вимірювання ФЗ коливань з похибкою $1.5^0 \dots 3^0$ на частотах до 10 МГц.

Для вимірювання ФЗ між напругами виду (11.1) може бути використана їх взаємнокореляційна функції (ВКФ), яка має вигляд

$$R_{12} = \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t)u_2(t)dt = U_{m1}U_{m2}\cos\varphi.$$

Значення ВКФ залежить від величини фазового зсуву між коливаннями і максимальне при $\varphi = 0^0$. Значення φ можна визначити як

$$\varphi = \arccos \frac{R_{12}}{U_{m1}U_{m2}} = \arccos K_{12},$$

де K_{12} – коефіцієнт взаємної кореляції вимірюваних коливань.

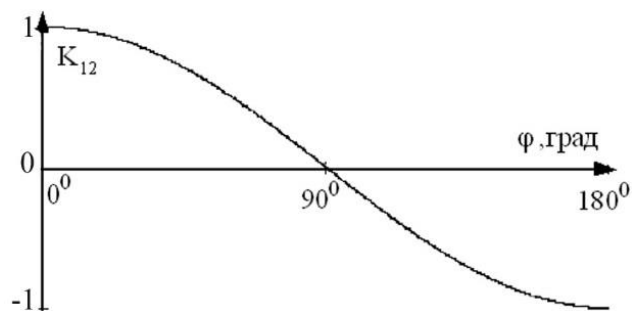


Рис. 11.6. Залежність коефіцієнта кореляції від фазового зсуву

На Рис. 11.6 наведено залежність K_{12} від величини фазового зсуву φ . Структурну схему кореляційного фазометра, що виконує оцінку K_{12} , наведено на Рис. 3.5.7. Кореляційному методу вимірювання ФЗ властиві наступні недоліки:

- необхідність виконання арифметичних операцій, наявність нелінійних елементів;

- залежність показань від амплітуд вхідних сигналів.

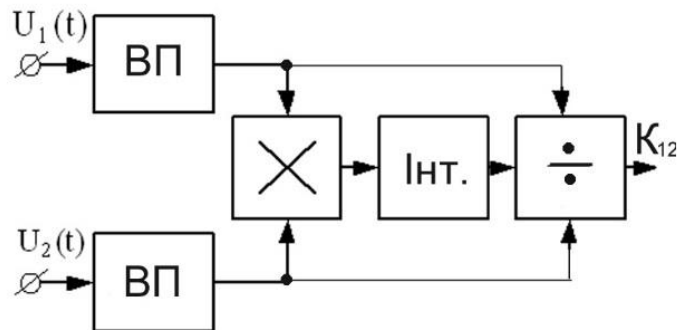


Рис. 11.7. Структурна схема кореляційного фазометра

Перевагою даного фазометра є висока завадостійкість і можливість роботи при малих відношеннях сигнал/шум. Реалізація схеми Рис. 11.7. на частотах десятків кілогерц можлива за допомогою мікроконтролера з табличним перерахунком K_{12} в ЗФ.

11.5 ЦИФРОВІ ФАЗОМЕТРИ

Цифровими фазометрами називають вимірювальні прилади, в яких вихідна інформація (вимірний ФЗ) подається в цифровому вигляді. З цієї точки зору такі прилади відрізняються від аналогових тільки формою подання результату. Основними методами перетворення фази на дискретний код є перетворення ФЗ або в часовий інтервал, або в напругу з подальшим аналого-цифровим перетворенням. Всі похибки, притамані цим перетворенням, розглянуті в розділах, що стосуються вимірювання часових інтервалів і напруги. Характерними особливостями фазометрів є проблеми вимірювання малих ФЗ, яким відповідають короткі часові інтервали і малі напруги перетворювачів.

11.6 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Який зміст має поняття фаза коливання?
2. Що називається фазовим зсувом двох коливань?
3. Поясніть застосування осцилографа для вимірювання зсуву фаз.
4. Який принцип дії компенсаційного фазометра?
5. Які частотні обмеження тригерного фазометра?

12 ОСЦИЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ КОЛИВАНЬ

12.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Для спостереження коливань і дослідження їх форми застосовують електронні осцилографи (ЕО). Осцилограф є універсальним вимірювальним приладом, вихідна інформація в якому подається у вигляді зображення залежності миттєвих значень коливання від заданих змінних (найчастіше – від часу). Досліджуване коливання відображається на екрані осцилографа у вигляді ліній чи фігур різної яскравості та кольору, які називаються осцилограмами. Осцилограма подає функціональний зв'язок виду $y = f(t)$ або $y = f(t, z)$. Осцилограму також використовують для вимірювання напруги, часових інтервалів і тривалості коливань, частоти, фазового зсуву, параметрів модульованих сигналів і багатьох фізичних величин, перетворених в електричні коливання.

На базі ЕО створюють прилади для вимірювання часових і частотних характеристик радіотехнічних пристроїв. Широке поширення ЕО зумовлене можливістю їх використання в смузі частот від нуля до десятків ГГц, в межах напруг сигналу від часток мілівольта до сотень вольт при тривалостях коливань від одиниць пікосекунд до декількох секунд.

ЕО можуть бути одно-, дво- і багатопроменевими, одно- і багатоканальними. Багатопроменеві ЕО дозволяють одночасно спостерігати коливання у різних точках радіоелектронного пристрою. У багатоканальних ЕО відбувається послідовне підключення до входу осцилографа кількох коливань з частотою комутації.

12.2 УЗАГАЛЬНЕНА СТРУКТУРНА СХЕМА УНІВЕРСАЛЬНОГО ОСЦИЛОГРАФА

На Рис. 12.1 наведено узагальнену структурну схему універсального осцилографа.

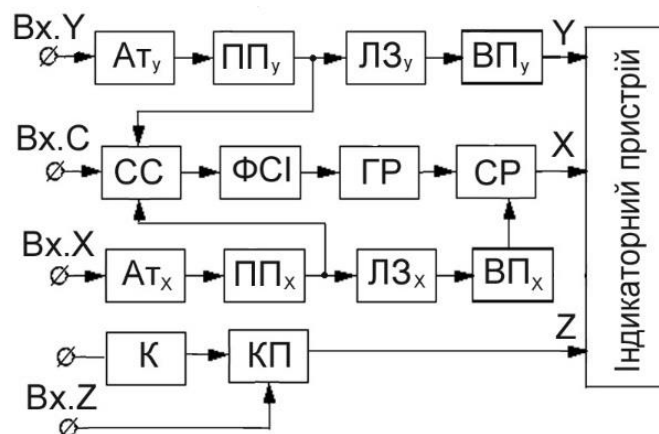


Рис. 12.1. Структурна схема одноканального осцилографа

Схема складається з таких блоків:

- каналів вертикального і горизонтального відхилення зображальної точки на індикаторному пристрої, які містять: Ат – вхідні атенюатори для керування рівнем досліджуваних коливань, ПП – попередні підсилювачі, ЛЗ – лінії затримки, ВП – вихідні підсилювачі каналів;

- каналу синхронізації і горизонтальної розгортки, який містить: СС - селектор синхронізації, за допомогою якого можна обрати часове «прив'язування» зображення до одної з вхідних напруг, чи до зовнішнього синхроколивання, яке підключається до входу С; ФСІ – формувач коротких синхроімпульсів; ГР – генератор лінійної горизонтальної розгортки; СР – селектор розгортки, за допомогою якого можна обрати джерело горизонтального відхилення зображальної точки – від вхідного коливання каналу Х, або від генератора лінійної напруги ГР;

- каналу калібрування і підсвічування, який складається з калібратора К – джерела коливання з відомими параметрами, яке можна подавати на входи осцилографа, КП – комутатора підсвічування, який формує коливання для модуляції яскравості відображальної точки або від калібратора, або від зовнішнього джерела, яке підключається до входу Z;

- індикаторного пристрою, який може мати вигляд або електронно-променевої трубки, або матричного екрану з цифровим керуванням.

Основними технічними характеристиками ЕО є:

- діапазон вимірюваних напруг $U_{min} \div U_{max}$;
- смуга частот каналів вертикального і горизонтального відхилення $f_{min} \dots f_{max}$;
- діапазон ступінчастого та плавного керування чутливості каналів;
- час наростання перехідної характеристики і відносна амплітуда викиду під час дії на вході стрибка напруги;
- чутливість і розрізнявальна здатність індикаторного пристрою по каналу Y, мВ/поділку;
- розрізнявальна здатність розгортки, мкс/поділку;
- вхідні опори і ємності каналів X, Y і Z.

12.3 Види ОСЦИЛОГРАФІЧНИХ РОЗГОРТОК

Розгортувальною, в загальному випадку, називають напругу, що визначає траєкторію і швидкість руху зображальної точки на індикаторі за відсутності сигналу у каналі Y. У цьому випадку видима спостерігачем лінія на індикаторному пристрої буде горизонтальною прямою, незалежно від форми розгортувальної напруги. Траєкторію, описувану зображальною точкою, або створюваний нею слід на екрані під дією розгортувальної напруги прийнято називати розгорткою. Розрізняють два види розгортки в залежності від джерела розгортувальної напруги: у разі використання внутрішнього генератора, розгортка буде лінійною, тобто миттєве положення зображальної точки на індикаторі буде лінійно залежати від часу; у разі використання зовнішнього джерела, миттєве положення точки стає функцією прикладеної напруги.

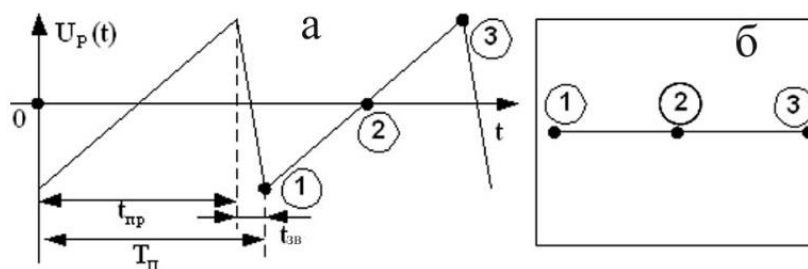


Рис. 12.2. Неперервна періодична розгортка

Лінійна періодична розгортка застосовується при дослідженні періодичних коливань. Якщо кожний наступний цикл пилоподібної напруги без затримки повторює попередній, розгортка називається неперервною періодичною. Періодично повторювані на індикаторі траєкторії накладаються одна на одну і сприймаються спостерігачем як єдине зображення. На Рис. 12.2,а подано форму розгортувальної напруги, а на Рис. 12.2,б – положення зображальної точки на екрані індикатора в різні моменти часу. На Рис. 3.6.2,а $t_{пр}$ – тривалість прямого ходу розгортки, $t_{зв}$ – тривалість зворотного ходу, $T_{п} = t_{пр} + t_{зв}$ – період повторення розгортки. Коли пилоподібні імпульси розділені інтервалами часу, розгортка називається імпульсною періодичною (Рис. 12.3).

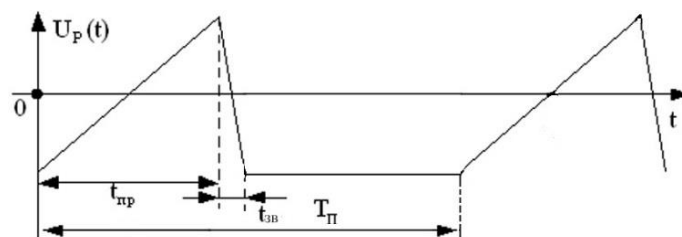


Рис. 12.3. Імпульсна періодична розгортка

Основні характеристики напруги, що створює лінійну періодичну розгортку наступні:

- період повторення $T_{\Pi} = t_{\text{пр}} + t_{\text{зв}}$ або частота повторення $F_{\Pi} = 1/T_{\Pi}$. Завжди виконується умова $t_{\text{пр}} \gg t_{\text{зв}}$. Як правило, обирають $F_{\Pi} > 20$ Гц, щоб запобігти мерехтінню зображення. При цьому використовується інерційна здатність людського ока зберігати зорове враження протягом $\sim 1/15$ с;
- амплітуда, що визначає максимальне відхилення зображальної точки за період;
- ступінь лінійності розгортувальної напруги (Рис. 12.4). Нелінійність розгортувальної напруги спотворює форму досліджуваного сигналу. Для опису лінійності розгортки вводять поняття коефіцієнту нелінійності

$$\delta_x = \frac{tg\alpha_1 - tg\alpha_2}{tg\alpha_2}.$$

Для універсальних осцилографів значення $\delta_x = 5\%$, для спеціальних - досягає $\delta_x = 0.1\%$.

- синхронність з напругою досліджуваного сигналу. Зображення буде нерухомим, якщо період T_{Π} розгортувальної напруги буде кратним або дорівнюватиме періоду досліджуваного сигналу T . Для забезпечення цієї вимоги осцилограф оснащують схемами синхронізації, які «прив'язують» частоту і часове положення розгортувальної напруги до частоти і фази вхідного колювання.

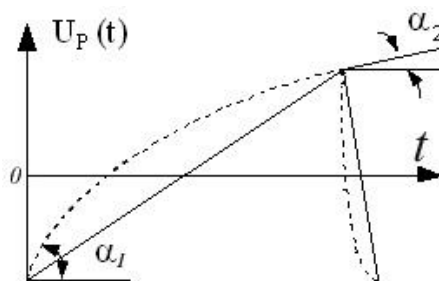


Рис. 12.4. Спотворення лінійної розгортки

Лінійна чекальна розгортка використовується при дослідженні різних імпульсних процесів, у тому числі неперіодичних. Безперервна розгортка не дозволяє спостерігати одноразові імпульси і виявляється малоєфективною при спостереженні сигналів з великою шпаруватістю. Чекальна розгортка "очікує" приходу досліджуваного імпульсу і запускається в момент приходу сигналу (Рис.12.5). Для запуску розгортки використовується компаратор, який формує імпульс запуску розгортки, якщо $u_{BX}(t) \geq U_{\text{пор}}$, де $U_{\text{пор}}$ – керований рівень напруги спрацювання компаратора. Лінія затримки (ЛЗ) у каналах відхилення (Рис.12.1) служить для невеликої затримки досліджуваного

сигналу відносно початку розгортки (t_3 на Рис. 12.5) з метою відображення переднього фронту імпульсу.

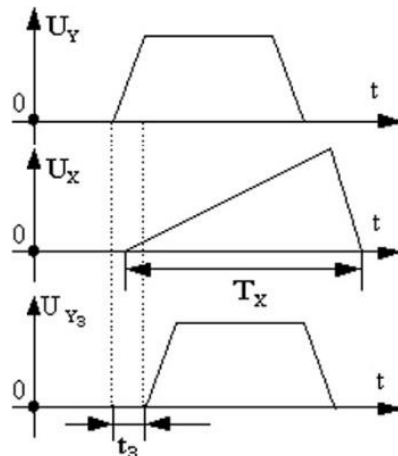


Рис. 12.5. Чекальна розгортка

Синусну розгортку можна одержати, підімкнувши за допомогою селектора розгортки СР (див. Рис. 12.1) вихідну синусну напругу каналу Х до входу горизонтального відхилення індикатора. У цьому випадку положення зображальної точки змінюється за синусним законом. Миттєве значення відхилення точки по горизонталі визначається співвідношенням

$$x(t) = U_x h_x \sin \omega t = a \sin \omega t, \quad (12.1)$$

де U_x – амплітуда напруги в каналі Х, h_x – чутливість каналу Х, a – максимальне відхилення зображальної точки по горизонталі. Якщо в канал Y подати синусну напругу такої ж частоти, відхилення точки по вертикалі визначається співвідношенням

$$y(t) = U_y h_y \sin(\omega t + \varphi) = b \sin(\omega t + \varphi), \quad (12.2)$$

де b – максимальне відхилення зображальної точки по вертикалі. При одночасному подаванні синусних напруг на обидва входи, зображальна точка рухається, описуючи фігуру Ліссажу. Скориставшись виразами (12.1) та (2.3.6), визначимо її рівняння. З виразу (12.1) $\sin \omega t = \frac{x}{a}$, тоді $\cos \omega t = \sqrt{1 - \sin^2 \omega t} = \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{a}$. Підставимо у тригонометричну формулу $\sin(\omega t + \varphi) = \sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi$ одержані співвідношення. У підсумку маємо

$$y(t) = \frac{b}{a} (x(t) \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2(t)} \sin \varphi). \quad (12.3)$$

Рівняння (12.3) є рівнянням еліпса, форма якого залежить від амплітуд відхилень по вертикалі b і горизонталі a і різниці фаз φ . Розглянемо деякі окремі випадки цих співвідношень і їх вплив на зображення на екрані:

- $\varphi = 0^\circ$, $y = \frac{b}{a} x$, на екрані буде спостерігатися пряма лінія з кутом нахилу $\theta_1 = \arctg \frac{b}{a}$;

• $\varphi = 180^\circ$, $y = -\frac{b}{a}x$, на екрані буде спостерігатися пряма лінія з кутом нахилу $\theta_2 = -\arctg \frac{b}{a}$; якщо $b = a$, $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 135^\circ$;

• $\varphi = 90^\circ$, $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, це рівняння еліпса з півосями, що за напрямом збігаються з напрямом осей координат. При $a = b = r$ на екрані буде коло з радіусом r , описуване рівнянням $x^2 + y^2 = r^2$. У попередніх розділах було розглянуто застосування синусної розгортки для вимірювання частоти і фази.

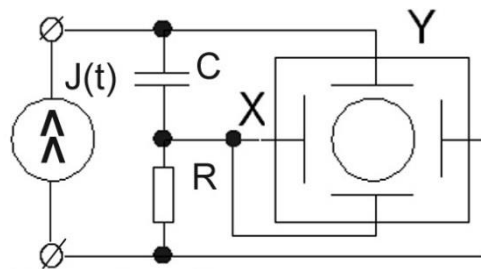


Рис. 12.6. Схема отримання колової розгортки

Колова розгортка є окремим випадком синусної розгортки, коли максимальні відхилення точки в обох напрямках однакові. Для одержання колової розгортки слід забезпечити зсув фаз між напругами каналів $|\varphi_y - \varphi_x| = 90^\circ$. Спрощена схема отримання колової розгортки представлена на Рис. 12.6. Зсув фаз на 90° на різних частотах у цій схемі можливий, якщо RC-коло живиться від ідеального джерела струму, до чого можна наблизитись у схемі конкретного осцилографа. Навіть у цьому випадку, враховуючи, що $X_C = 1/\omega C$, форма лінії на екрані буде еліптичною, але із збереженням напрямку осей, тобто, для одержання кола на різних частотах, слід змінювати чутливість одного з каналів. Використання колової розгортки для вимірювання частоти і фази розглянуто у попередніх розділах.

12.4 ІНДИКАТОРНИЙ ПРИСТРІЙ

У більшості ЕО до останнього часу в якості індикаторного пристрою використовувалась електронно-променева трубка (ЕПТ). ЕПТ є електронно-вакуумним приладом, в якому енергія спрямованого потоку електронів перетворюється на енергію люмінесцентного світіння екрану. Реальні ЕПТ мають складну конструкцію, залежну від вимог до параметрів зображення. Найскладніші ЕПТ, так звані ЕПТ біжної хвилі, використовуються для відображення коливань НВЧ. Інший напрямок ускладнення ЕПТ – це втілення можливості запам'ятовування однократних сигналів, або коливань з великою шпаруватістю. Такі ЕПТ мають багатопарові електрично керовані екрани, які мають режими запам'ятовування і відтворення зображення.

Останнім часом все більшого поширення набуває використання цифрових ЕО та застосування дисплеїв комп'ютерів в якості осцилографів. Такі прилади

суттєво розширюють можливості ЕО у напрямку запису і відтворення однократних сигналів, запам'ятовування і відображення реалізацій випадкових процесів, багатоканального відображення сигналів з багатьох точок відведення тощо. Структура індикаторів таких ЕО може бути різною, але їх спільним елементом є цифровий дисплей у вигляді двокоординатної світловипромінювальної матриці. Спрощену структурну схему однієї з можливих реалізацій цифрового ЕО наведено на Рис. 12.7. Пристрій може працювати в двох режимах:

- реального часу, тобто безпосереднього АЦ перетворення миттєвих значень сигналу і виведення їх на дисплей;
- запам'ятовування реалізації сигналу у вигляді сукупності миттєвих значень з подальшим послідовним виведенням всієї сукупності на дисплей. Такий режим є корисним для вивчення однократних, випадкових сигналів.

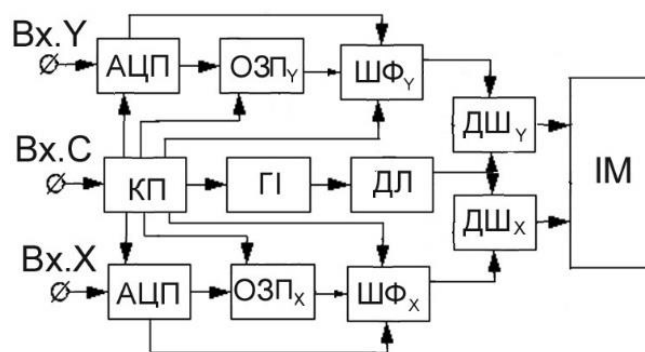


Рис. 12.7. Структурна схема цифрового індикатора

Схема містить двоканальний АЦП, оперативні запам'ятовуючі пристрої ОЗП_x та ОЗП_y, які під'єднані до входів шинних формувачів ШФ_x та ШФ_y. Керувальний пристрій КП в залежності від режиму підключає до входів дешифраторів каналів ДШ_x та ДШ_y або вихід АЦП, або вихід ОЗП. ДШ_x та ДШ_y адресують точки на індикаторній матриці ІМ, які відповідають миттєвим значенням напруг каналів. Перелік адрес ОЗП відбувається за допомогою синхронізованого генератора імпульсів ГІ з двійковим дільником ДЛ. У разі застосування лінійної розгортки на ДШ_x подається послідовність чисел від ДЛ.

Цифрова індикація висуває ряд додаткових вимог до параметрів ЕО. Серед них:

- до частоти ГІ, яка, виходячи з теореми Котельникова, має бути $f_{ГІ} > 2f_{max}$, де f_{max} – верхня гранична частота смуги прозорості підсилювачів каналів осцилографа. Враховуючи, що гранична частота підсилювача визначається за рівнем – 3 дБ, наведена умова є недостатньою для уникнення явища «перетікання» (aliasing) спектра. Тому необхідно на вході АЦП встановити додатковий «антіеліазинговий» ФНЧ, який забезпечує на частоті $f_{ГІ}/2$ коефіцієнт

передавання $K \left(\frac{f_{\Gamma 1}}{2} \right) < \frac{1}{2^n}$, де n – розрядність АЦП. Цей захід зводить похибку перетікання до значення молодшого розряду цифрового подання сигналу;

- до швидкодії АЦП, який повинен виконувати аналого-цифрове перетворення з частотою, більшою за $f_{\Gamma 1}$, враховуючи потребу у часі для перезапису кодів тощо;
- до розрядності АЦП, за рахунок якого з'являється додаткова похибка дискретизації. Необхідну розрядність АЦП орієнтовно можна визначити із співвідношення $n > \lg_2 D$, де D – динамічний діапазон підсилювача;
- до об'єму ОЗП, виходячи з бажаної тривалості запису реалізації сигналу.

12.5 СТРОБОСКОПІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ОСЦИЛОГРАФА

Під час розроблення високочастотних електронних пристроїв часто виникає завдання детального розгляду форми періодичних коливань, коли індикаторний пристрій не забезпечує необхідної швидкодії. У цих випадках використовується «розтягування» масштабу часу досліджуваного коливання, яке називається стробоскопічним перетворенням. Ідея методу стробоскопічного перетворення полягає у зчитуванні і запам'ятовуванні миттєвих значень періодичного коливання, взятих в моменти часу, які просуваються вздовж тривалості досліджуваного коливання. Таким чином можна одержати майже періодичну послідовність відліків миттєвих значень коливання, «розтягнутого» за часом.

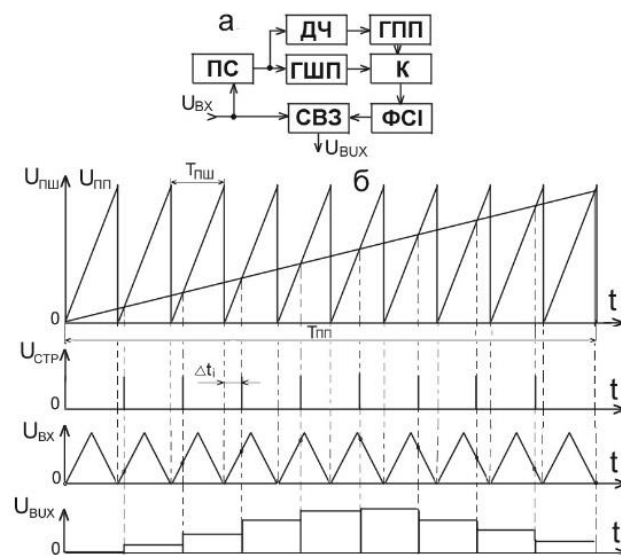


Рис. 12.8. Стробоскопічний перетворювач

Структурну схему стробоскопічного перетворювача наведено на Рис. 12.8,а, а часові діаграми напруг у його основних вузлах – на Рис. 12.8,б. Схема працює наступним чином. Два синхронізовані генератори лінійних напруг – генератор швидкої пили (ГШП) та генератор повільної пили (ГПП) формують

напруги рівної амплітуди, які порівнюються компаратором К. Кожний наступний момент рівності пилоподібних напруг запізнюється відносно моменту запуску ГШП на час $i\Delta t = iT_{\text{ШП}}^2/T_{\text{ПП}}$, де $i = 0, 1, 2, \dots, T_{\text{ПП}}/T_{\text{ШП}}$ (на Рис. 3.6.9,б $i = 1, \dots, 10$). В моменти рівності напруг перепад на виході К запускає формувач строб-імпульсів, який формує послідовність коротких імпульсів, часова відстань між якими дорівнює $T_{\text{ШП}} + \Delta t$. Ця послідовність подається на строб-вхід схеми вибірки та запам'ятовування (СВЗ), на сигнальний вхід якої подається перетворюване коливання. У СВЗ відбувається процес «стробування» сигналу - множення миттєвого значення сигналу на сталу амплітуду строб-імпульсу і запам'ятовування добутку. У підсумку на виході СВЗ буде ступінчаста напруга з обвідною, яка повторює форму вхідного коливання із зміненням у $T_{\text{ПП}}/T_{\text{ШП}}$ разів масштабом часу.

12.6 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. З якою метою використовують осцилограф?
2. Який функціональний склад осцилографа?
3. Для чого застосовується синхронізація в осцилографі?
4. Яке призначення лінійної горизонтальної розгортки?
5. Як сформувати колову розгортку?
6. Назвіть складові цифрового осцилографа.
7. Сформулюйте вимоги до АЦП цифрового осцилографа.
8. Для дослідження яких коливань можна використовувати стробоскопічне перетворення?

13 ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ

13.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

При дослідженнях, випробуваннях вимірюваннях параметрів, характеристик, режимів роботи різних радіоелектронних схем, пристроїв і систем необхідні джерела випробувальних коливань найрізноманітніших форм, частот і потужностей. За допомогою цих джерел знімають характеристики різних пристроїв; вимірюють ряд параметрів сигналів, що використовують джерела в якості міри (частоту гармонічних коливань, частоту проходження імпульсів, коефіцієнти амплітудної (АМ) і частотної (ЧМ) модуляції тощо); градуують вимірювальні прилади; імітують сигнали, що надходять в досліджувану апаратуру за реальних умов її роботи тощо. Подібні джерела називаються вимірювальними генераторами сигналів. Вони відрізняються від звичайних генераторів можливістю точної установки і регулювання в широких межах вихідних параметрів (частоти, рівня напруги або потужності), їх високою стабільністю і наявністю вимірювальних приладів, що контролюють певні параметри сигналів.

В залежності від форми вихідних сигналів розрізняють вимірювальні генератори гармонічних і релаксаційних (розривних, імпульсних) коливань. До імпульсних відносять генератори коливань прямокутної і спеціальної, відмінної від прямокутної (трикутної, пилкоподібної тощо) форм. У спектрі вихідного сигналу генератора гармонічних коливань є одна або кілька складових (за рахунок модуляції). Вихідні коливання імпульсного генератора містять широкий спектр гармонік, що мають сумірні амплітуди.

У відповідності з видом модуляції розрізняють генератори з амплітудною, частотною, імпульсною, комбінованою модуляцією; з частотною, фазовою і комбінованою маніпуляцією.

Незалежно від призначення, принципу дії та схемного виконання, будь-який генератор незгасних коливань складається з нелінійного підсилювача, кола додатного зворотного зв'язку і джерела живлення постійного струму. Форма і частота вихідних коливань визначаються тільки параметрами кіл зворотного зв'язку генератора.

Генератор гармонічних коливань найчастіше містить у своєму складі вузькосмугову коливальну систему, а принцип дії релаксаційного генератора заснований на зарядно-розрядних або накопичувально-поглинальних процесах, що протікають в широкосмугових колах додатного зворотного зв'язку.

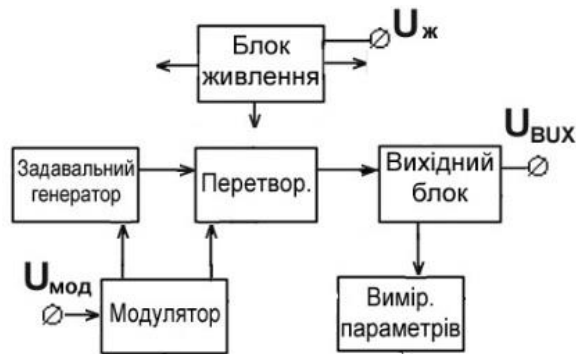


Рис. 13.1. Структурна схема вимірювального генератора

Узагальнена структурна схема вимірювального генератора сигналів (непрограмованого типу) наведена на Рис. 13.1 і складається з таких функціональних блоків:

- задавальний генератор – основний блок вимірювального генератора, який визначає важливіші характеристики вихідного коливання – діапазон частот, точність встановлення частоти і її стабільність;
- перетворювач служить для підвищення рівня коливання задавального генератора або надання йому певної форми. Це може бути підсилювач напруги (потужності), формувач імпульсів тощо;
- модулятор служить для надання сформованому коливанню властивостей сигналу, шляхом зміни параметрів коливання за законом, наданим внутрішнім або зовнішнім джерелами;
- вихідний блок призначено для регулювання рівня напруги або потужності вихідного коливання і зміни вихідного опору приладу. Зазвичай має у своєму складі атенюатор, узгоджувальний пристрій, повторювач напруги;
- вимірювач параметрів призначено для контролю параметрів вихідних коливань. Це можуть бути електронний вольтметр, вимірювач потужності, вимірювач коефіцієнту модуляції, частотомір;
- блок живлення забезпечує стабілізацію напруг живлення всіх елементів приладу.

13.2 НИЗЬКОЧАСТОТНІ АНАЛОГОВІ ГЕНЕРАТОРИ

У вимірювальній техніці генератори низьких (НЧ) частот застосовують для налаштування і випробування різних НЧ вузлів радіоелектронної (переважно звукової) апаратури. НЧ генератори:

- формують коливання синусної форми, стабільної частоти і амплітуди;
- мають дискретно керований вихідний опір;
- мають регулювання напруги (потужності) вихідного коливання в широких межах.

В залежності від виду задавального генератора розрізняють три типи НЧ генераторів: LC – генератори, генератори биттів (гетеродинного типу) і RC–генератори.

LC – генератори. У задавальному генераторі застосовується вузькосмуговий коливальний контур, що складається з котушки індуктивності L і конденсатора C . Такі генератори застосовуються дуже рідко, бо для отримання низьких частот потрібні великі значення L і C , до того ж важко реалізувати їх керування в широких межах.

Генератори на биттях. У таких генераторах напруга НЧ отримує - ся за рахунок змішування двох ВЧ напруг, близьких за частотою, з наступним виділенням напруги різницевої частоти f_p – частоти биттів.

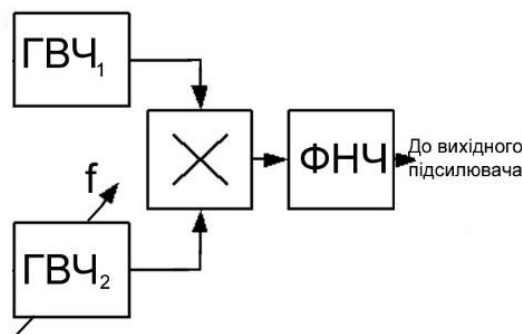


Рис. 13.2. Структурна схема задавального генератора на биттях

Структурна схема задавального генератора, що реалізує метод биття, наведена на Рис. 13.2. В її складі ГВЧ1 має фіксовану стабільну частоту, ГВЧ2 – частоту, керовану в заданих межах. Основна перевага генератора на биттях – це широкий діапазон зміни частоти. Основний недолік – це низька відносна стабільність частоти, що пов’язано з перенесенням абсолютної нестабільності частоти ГВЧ2 на відносно низьку робочу частоту вихідних коливань. Наприклад, $f_{ГВЧ2} = 10f_p$, $\delta f_{ГВЧ2} = 0,1\%$, тоді $\delta f_p = 1\%$.

RC – генератори. Самозбудження RC-генератора ґрунтується на виконанні балансу фаз у колі додатного зворотного зв'язку на частоті генерації. Найпоширенішою схемою, яка забезпечує зручне керування потрібними фазовими співвідношеннями є RC-коло, зібране за схемою моста Вина, схему якого подано на Рис. 13.3,а, а векторну діаграму струмів і напруг для однієї частоти ω_0 – на Рис. 13.3,б.

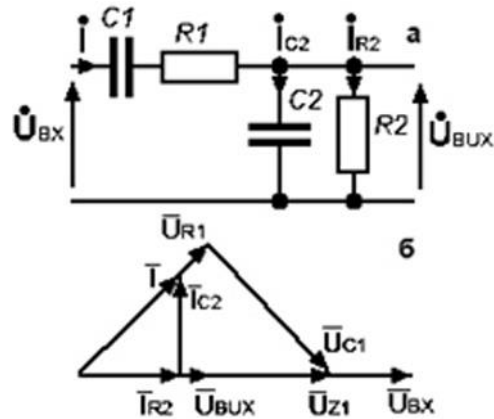


Рис. 13.3. Міст Віна

Коефіцієнт передавання напруги кола дорівнює

$$K_u = \frac{\dot{U}_{BUX}}{\dot{U}_{BX}} = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2},$$

де $\dot{Z}_1 = R_1 + 1/j\omega C_1$, $\dot{Z}_2 = R_2/(1 + j\omega R_2 C_2)$. Визначимо умови, за яких коефіцієнт передавання є величиною дійсною, тобто зсув фази між вхідною та вихідною напругою дорівнює 0.

$$K_u = \frac{Z_2 e^{j\varphi_2}}{Z_1 e^{j\varphi_1} + Z_2 e^{j\varphi_2}} = \frac{1}{\frac{Z_1}{Z_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} + 1}.$$

З останнього виразу видно, що умова дійсності коефіцієнту передавання співпадає з умовою $\varphi_1 = \varphi_2$, де

$$\varphi_1 = -\arctg \frac{1}{\omega R_1 C_1}, \quad \varphi_2 = -\arctg \omega R_2 C_2.$$

Означена умова має місце на частоті

$$\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2},$$

тобто на цій частоті може бути створена умова балансу фаз. У разі створення генератора змінної частоти зручно задати таке співвідношення між величинами елементів

$$R_1 = R_2 = R, \quad C_1 = C_2 = C,$$

тоді

$$\varphi_1 = \varphi_2 = -45^\circ, \quad \omega_0 = 1/RC, \quad K_u = 1/3.$$

Змінювати частоту можна або блоком двох однакових конденсаторів змінної ємності, або сдвоєним потенціометром. Для самозбудження генератора необхідний неінвертувальний підсилювач з коефіцієнтом підсилення напруги, більшим за 3.

АЧХ кола Віна має незначну частотну вибірковість, тому не може розглядатись як фільтр для виділення однієї синусоїди частоти ω_0 . Єдина можливість одержати неспотворену синусоїду – точно додержуватись балансу амплітуд під час наростання коливань після збудження, тобто керувати коефіцієнтом підсилення, утримуючи підсилювач на лінійній ділянці його передавальної характеристики.

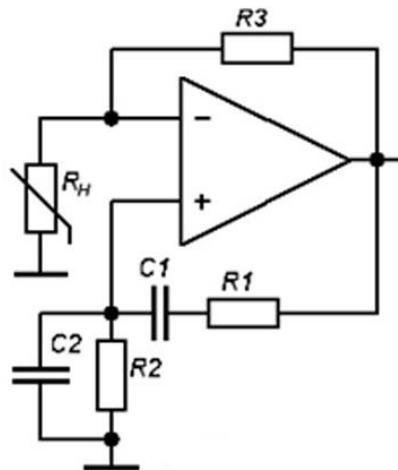


Рис. 13.4. RC-генератор з мостом Віна

Найбільш поширеною схемою RC генератора з колом Віна є схема на операційному підсилювачі з нелінійним колом від'ємного зворотного зв'язку, подана на Рис. 13.4. Під час збудження співвідношення між опорамі від'ємного зворотного зв'язку таке

$$K_0 = 1 + \frac{R_3}{R_H(0)} > 3,$$

відповідно, $R_3 > 2R_H(0)$. Із збільшенням амплітуди коливань збільшується опір $R_H(U_m)$ і автоматично виконується умова $R_3 = 2R_H(U_m)$, утримуючи підсилювач на лінійній ділянці підсилення. Якщо замість нелінійного опору $R_H(U_m)$ застосувати сталий опір, у разі виконання умови $R_3 > 2R_{CT}$, операційний підсилювач переходить у режим підсилювача-обмежувача коливань. На його виході формується періодична послідовність майже прямокутних імпульсів, частота яких дорівнює ω_0 .

RC-генератори мають переваги порівняно з LC-генераторами щодо діапазону перестроювання частоти. Виходячи з формул частоти генерованого коливання, у разі керування її ємністю конденсаторів, коефіцієнти перекриття діапазону частот дорівнюють

$$K_{fRC} = f_{\max} / f_{\min} = C_{\max} / C_{\min},$$

$$K_{fLC} = f_{\max} / f_{\min} = \sqrt{C_{\max} / C_{\min}},$$

C_{\max} , C_{\min} - межі зміни ємності настроювального конденсатора.

Суттєвими недоліками RC генераторів є відносно низька стабільність частоти та відносно великий рівень нелінійних спотворень сформованого коливання. Обидва недоліки пояснюються низькою частотною вибірковістю RC кіл зворотного зв'язку.

13.3 ВИСОКОЧАСТОТНІ АНАЛОГОВІ ГЕНЕРАТОРИ

У діапазоні високих частот використовуються як генератори сигналів, так і генератори стандартних сигналів. ГС використовуються для живлення вимірювальних передавальних антен та інших потужних пристроїв, а ГСС – для випробувань і налаштування радіоапаратури. Структурна схема високочастотного вимірювального генератора повністю співпадає з Рис. 13.1.

Задавальний генератор найчастіше виконують за схемами індуктивної або ємнісної триточки. Робочий діапазон генератора розбивається на піддіапазони. Під час переходу з одного піддіапазону на інший перемикаються котушки індуктивності, а в межах одного піддіапазону налаштування виконується двома конденсаторами – грубого і точного встановлення частоти. Всі елементи задавального генератора відповідають основній вимозі – стабільності параметрів. Основним дестабілізуювальним чинником у задавальному генераторі є зміна температури під час роботи. Тому завжди при роботі з вимірювальними генераторами ставиться вимога їх початкового прогріву для усталення параметрів елементів, що визначають частоту коливань.

Перетворювач-модулятор зазвичай виконує кілька функцій – підсилення напруги задавального генератора, який має малий зв'язок з подальшими блоками з метою зменшення зовнішніх впливів на частоту коливань; модуляцію, якщо відсутній окремий блок модулятора; керування напругою і параметрами модуляції. У вимірювальному генераторі можуть застосовуватися амплітудна, частотна, фазова, імпульсна модуляції. Використовується в основному внутрішня модуляція, але завжди є можливість застосування зовнішніх джерел модулювальних сигналів.

Вихідний блок включає калібрований атенюатор і схему формування вихідного опору генератора.

Цифровий частотомір, електронний вольтметр і вимірювачі характеристик модуляції застосовуються для установки і контролю відповідних параметрів вихідного коливання.

13.4 ГЕНЕРАТОРИ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

Вимірювальні НВЧ генератори застосовуються для вимірювання чутливості різних радіоприймальних пристроїв відповідного діапазону частот, живлення НВЧ енергією антен і вимірювальних ліній, а також при дослідженні характеристик середовищ і речовин в діапазоні НВЧ. За типом вихідного з'єднувача НВЧ генератори поділяються на коаксіальні і більш високочастотні - хвилеводні. Вони виконуються зазвичай з невеликим перекриттям по частоті у межах одного піддіапазону – порядку 2 разів (одна октава). Некалібрована вихідна потужність вимірювальних генераторів може перевищувати кілька Вт, а калібрована – в межах кількох мВт. Задавальний генератор може виконуватися на відбивних клістронах, магнетронах, лампах зворотної хвилі (ЛЗВ), діодах Ганна, лавинно-пролітних діодах (ЛПД) тощо. Найчастіше задавальний генератор є єдиним активним пристроєм, в якому відбувається модуляція і маніпуляція коливань. Модулятор необхідний для вироблення або передачі від зовнішніх джерел сигналів, за допомогою яких здійснюється амплітудна, імпульсна і частотна модуляція задавального генератора. Вимірювач потужності і частотомір призначені для установки, відповідно, значень потужності і частоти вихідного сигналу вимірювального генератора. Атенюатор застосовується для плавного та фіксованого зменшення потужності вихідного сигналу генератора. Одна з найважливіших задач під час використання НВЧ генераторів - це забезпечення узгодженого режиму їх під'єднання до досліджуваних кіл або «розв'язування» генератора від інших кіл за допомогою вентилів, спрямованих відгалужувачів тощо.

13.5 ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ІНФРАНИЗЬКИХ І НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

Цифрові генератори низьких та інфранизьких частот мають більш високі, ніж аналогові, метрологічні характеристики. Вони відрізняються точністю установки та стабільністю частоти, малим коефіцієнтом гармонік і сталістю рівня вихідного коливання. Подібні генератори зручніше аналогових в експлуатації: істотно простіше встановлення необхідної частоти, вища швидкодія, більш наочна індикація. Цифрові генератори мають можливість автоматичного налаштування частоти і можуть застосовуватися спільно з цифровими засобами оброблення інформації. Сучасні цифрові генератори обов'язково мають вбудований мікроконтролер.

Принцип роботи цифрових генераторів полягає в періодичному зчитуванні миттєвих значень коливання, записаних в цифровій формі у пам'ятовуючому пристрої, їх цифро-аналоговому перетворенні і подальшій аналоговій фільтрації. Такий принцип дозволяє формувати коливання будь-якої форми, що можна використати, наприклад, для налаштування і випробування медичної діагностичної апаратури. Іншими словами, використовується ступінчаста апроксимація бажаної функції з наступним згладжуванням одержаних «сходинок». Структурну схему цифрового

генератора подано на Рис. 13.5. Схема містить стабілізований кварцом генератор імпульсів (КГ), який формує стабільну за частотою f_{KB} періодичну послідовність коротких імпульсів.

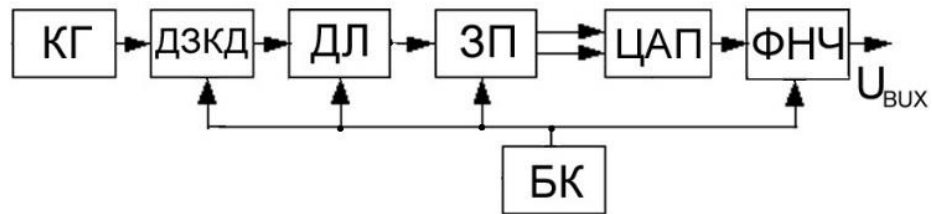


Рис. 13.5. Спрощена схема цифрового генератора

Імпульси подаються на дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД) – програмований пристрій, що під управлінням блоку керування (БК), формує послідовність імпульсів з частотою f_{KB}/N_d , де N_d – керований коефіцієнт ділення. Ці імпульси підраховуються двійковим лічильником (ДЛ), вихідні коди якого адресують комірки запам'ятовуючого пристрою (ЗП), в яких записані коди миттєвих значень коливання, що формується генератором. Ці коди послідовно подаються на ЦАП, де перетворюються на миттєві значення коливання. У підсумку на виході ЦАП формується ступінчаста крива, яка має обвідну, що співпадає з шуканим коливанням. Ступінчаста функція згладжується ФНЧ і подається на вихід генератора.

Очевидно, що ступінчаста крива тим краще апроксимує синусоїду (найчастіше формується саме синусоїда), чим більша кількість ступенів p є на періоді коливання. Спектральний аналіз такої ступінчастої напруги показує, що його спектр містить основну частоту і ряд її гармонік, причому найближчою гармонікою буде гармоніка з номером $p - 1$, наступною – гармоніка з номером $p + 1$, потім гармоніки з номерами $2p - 1$ і $2p + 1$. Такі співвідношення дозволяють досить просто здійснити високоякісну фільтрацію вихідної напруги, тобто отримати синусоїду з дуже малим коефіцієнтом гармонік (десяті й соті частки відсотка). У разі роботи в широкому діапазоні частот сформованих коливань є необхідність в зміні граничної частоти ФНЧ, що робиться за допомогою БК. Якість сформованого коливання залежить від розрядності ЗП та ЦАП, які визначають шум дискретизації, що призводить до так званого фазового шуму згенерованого коливання. Орієнтовно розрядність повинна бути такою, щоб середньоквадратичне значення похибки дискретності не перевищувало значення коефіцієнта гармонік.

Частоту сформованого сигналу при фіксованій кількості ступенів p регулюють, змінюючи крок дискретизації, що досягається зміною коефіцієнту ділення ДЗКД.

Для зменшення об'єму ЗП у нього записують коди миттєвих значень одної чверті періоду коливання, враховуючи симетрію синусоїди відносно горизонтальної та вертикальної осей. У цьому випадку ускладнюється схема ДЛ – він стає реверсивним, і ускладнюється алгоритм його роботи.

13.6 СИНТЕЗАТОРИ ЧАСТОТИ

Сучасним напрямком розвитку радіоелектронних систем є підвищення ефективності використання відведеної смуги частот для передавання якомога більшого обсягу інформації за одиницю часу. Для цього використовуються складні види модуляції, які вимагають високої спектральної «чистоти» використовуваних коливань. Для розроблення і випробування таких систем необхідні джерела коливань, які відповідають низці суперечливих вимог. Серед них:

- велика швидкість переходу з частоти на частоту;
- малий крок зміни частоти;
- малий фазовий шум, тобто мала миттєва нестабільність частоти коливання.

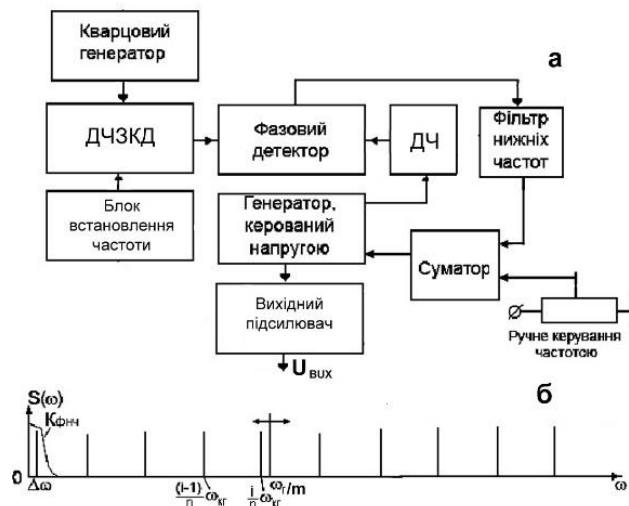


Рис. 13.6. Синтезатор частоти

Джерела коливань з зазначеними властивостями виготовляються за схемою синтезатора частоти. Це генератори гармонічних коливань з дискретним налаштуванням частоти і стабільністю на рівні стабільності кварцових генераторів. Вони мають можливість програмного перестроювання частоти і легко сполучаються з інформаційно-вимірвальними системами. Найпоширенішою схемою, що використовується у вимірвальних генераторах є схема опосередкованого синтезу коливання із застосуванням системи фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ), структурну схему якої подано на Рис. 13.6,а. Пристрій працює наступним чином. Стабільність сформованої частоти забезпечується кварцовим генератором, що працює на сталій частоті $\omega_{\text{кГ}}$. Крок зміни частоти забезпечується дільником частоти із змінним коефіцієнтом ділення (ДЧЗКД), коефіцієнт ділення якого n визначається за допомогою блоку встановлення частоти.

З виходу ДЧЗКД коливання з стабільною частотою $\omega_{\text{кГ}}/n$ подається на формувач періодичної послідовності коротких імпульсів. Лінійчастий спектр вихідного коливання формувача, поданий на Рис. 13.6,б, містить суму

гармонік майже однакової амплітуди з частотною відстанню між ними, що дорівнює $\omega_{КГ}/n$. Ця послідовність подається на один вхід фазового детектора. На його другий вхід подано коливання від генератора, керованого напругою, частота якого поділена дільником частоти ДЧ у m разів. Розглянемо процеси, що відбуваються у фазовому детекторі, що є помножувачем вхідних коливань. На його входи подані коливання

$$U_{Гі}(t) = \cos \frac{i}{n} \omega_{КГ} t, \quad U_{Г}(t) = \cos \left(\frac{\omega_{Г}}{m} t + \phi \right).$$

Вихідна напруга фазового детектора дорівнює

$$\begin{aligned} U_{ФД}(t) &= K_{ФД} U_{Гі}(t) U_{Г}(t) = K_{ФД} \cos \frac{i}{n} \omega_{КГ} t \cos \left(\frac{1}{m} \omega_{Г} t + \phi \right) = \\ &= \frac{K_{ФД}}{2} \cos \left[\left(\frac{1}{m} \omega_{Г} - \frac{i}{n} \omega_{КГ} \right) t + \phi \right] + \frac{K_{ФД}}{2} \cos \left[\left(\frac{1}{m} \omega_{Г} + \frac{i}{n} \omega_{КГ} \right) t + \phi \right]. \end{aligned}$$

Фільтр нижніх частот виділяє складову вихідної напруги фазового детектора, пропорційну різниці частот керованого генератора та стабільного формувача, якщо ця різниця потрапляє у смугу прозорості ФНЧ. Частота керованого генератора залежить від напруги на виході суматора, яка складається з відфільтрованої напруги фазового детектора та керувальної напруги, знятої з потенціометра ручного керування частотою. Внаслідок ручного керування різниця частот коливань на входах фазового детектора набуває значення

$$\Delta\omega = \frac{1}{m} \omega_{Г} - \frac{i}{n} \omega_{КГ} < \omega_{ВФНЧ},$$

де $\omega_{ВФНЧ}$ - гранична частота ФНЧ. На виході ФНЧ з'являється керувальна напруга, що змінює частоту керованого генератора до значення $\Delta\omega = 0$. У підсумку частота керованого генератора стає рівною відповідній гармоніці опорного коливання з точністю до фази і утримується незмінною незалежно від дії дестабілізуювальних чинників. У разі відсутності ручного підстроювання частоти в схемі передбачається система пошуку, яка автоматично змінює частоту керованого генератора в межах смуги ФНЧ. Якщо необхідно налаштувати генератор на іншу частоту, у керувальному блоці змінюється коефіцієнт ділення ДЧЗКД, коливання з різницевою частотою з виходу фазового детектора потрапляє у смугу прозорості ФНЧ і процес автоматичного керування частотою повторюється на новій частоті керованого генератора. Сформоване таким чином коливання подається на вихідний підсилювач і далі – на вихід генератора.

13.7 ГЕНЕРАТОРИ ІМПУЛЬСНИХ КОЛИВАНЬ

Найбільш поширеними є вимірювальні генератори імпульсних коливань прямокутної форми. Вони використовуються при дослідженні, налаштуванні і випробуванні імпульсних електронних систем; при знятті перехідних характеристик окремих вузлів і апаратури в цілому; при дослідженні та налаштуванні широкосмугових підсилювачів, аналізаторів тощо. Генератори імпульсів прямокутної форми також виконують функції

задавальних генераторів у імпульсних пристроях, імпульсних модуляторах ВЧ і НВЧ вимірjувальних генераторів, а також джерел керувальних імпульсів для комутації різних електронних схем і пристроїв.

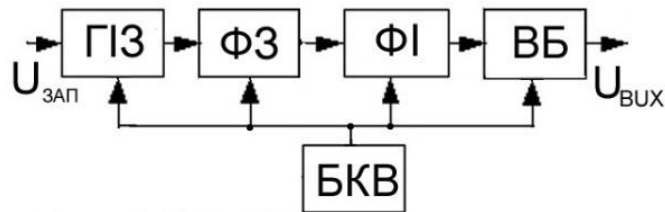


Рис. 13.7. Структурна схема генератора прямокутних імпульсів

Структурну схему генератора прямокутних імпульсів подано на Рис. 13.7. Вона складається з наступних блоків:

- генератора імпульсів запуску (ГІЗ) – джерела періодичної послідовності коротких імпульсів. До його складу зазвичай входить схема зовнішнього запуску. ГІЗ може працювати або в режимі самозбудження, або в режимі запуску від зовнішнього джерела. В режимі самозбудження він формує послідовність імпульсів в широкому діапазоні частот повторення, яка задається блоком керування та вимірювання (БКВ). Для стабілізації частоти використовуються схеми мультівібраторів з кварцом, які забезпечують малі значення миттєвої нестабільності періоду коливання (джитер);
- формувач регульованої затримки (ФЗ) забезпечує запуск формувача імпульсів (ФІ) з затримкою відносно імпульсу запуску. Завдяки ФЗ зручно спостерігати на екрані осцилографа реакцію кіл на імпульсну дію;
- Формувач імпульсів (ФІ) виробляє імпульси прямокутної форми з регульованою в широких межах тривалістю. Для забезпечення сталості прямокутної форми використовуються тригерні схеми, які запускаються зсунутими у часі короткими імпульсами запуску і скидання. Часова відстань між цими імпульсами і визначає тривалість сформованих коливань;
- вихідний блок містить розв'язувальний каскад, що забезпечує необхідний вихідний опір приладу; перетворює однополярні імпульси в двополярні; регулює вихідну напругу;
- блок керування та вимірювання (БКВ) об'єднує всі блоки в єдиний прилад і відображає параметри сформованого коливання.

Генератори, що випускаються промисловістю, формують прямокутні імпульси обох полярностей тривалісті від одиниць наносекунд до одиниць секунд, з частотою повторення від сотих часток Гц до сотень МГц, з вихідною напругою від мілівольт до сотень вольт.

13.8 ГЕНЕРАТОРИ ШУМОВИХ КОЛИВАНЬ

Розв'язання завдань розроблення і випробування приймальної апаратури потребує формування на вході приймачів сумішей з дозованим вмістом модульованих коливань і випадкових коливань, які моделюють вплив

шумів під час реальної роботи приймального пристрою. Для цього створені вимірювальні генератори шумових коливань (генератори шуму), що генерують флуктуаційні напруги з певними імовірнісними характеристиками. Структурна схема генератора шуму аналогічна схемі, поданій на Рис. 13.1.

Задавальний генератор (ЗГ). Є первинним джерелом шуму, напруга якого повинна мати у всій необхідній смузі частот задані характеристики – закон розподілу ймовірностей, кореляційну функцію, спектральну густину. Найчастіше формуються коливання, що мають рівномірну спектральну густину потужності в заданій смузі частот (теоретично - це білий шум) і нормальний закон розподілу миттєвих значень. В ЗГ використовуються фізичні явища, при яких виникають досить інтенсивні шуми зі статистичними характеристиками, які піддаються математичного аналізу. Такі первинні джерела шуму досить різноманітні.

Нагрітий дротяний резистор – джерело теплового шуму, середньоквадратичне значення напруги якого розраховується за формулою Найквіста

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kTR\Delta f,$$

де $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - стала Больцмана; T – абсолютна температура резистора в градусах Кельвіна; R – опір резистора; Δf – смуга прозорості перетворювача або вихідного блоку генератора шуму. Конструктивно резистор виконується у вигляді вольфрамової спіралі, намотаної на керамічний каркас, температура якої підтримується стабільною.

Болометричний генератор шуму, що також відноситься до джерел теплового шуму, являє собою вакуумний балон, всередині якого між платиновими затискачами натягнута тонка вольфрамова нитка діаметром 8...20 мкм. Нитка нагрівається постійним струмом, а її температура вимірюється оптичним пірометром. Болومتر найбільш часто застосовується в коаксиальному генераторі шуму НВЧ діапазону.

Теплові джерела шуму часто використовуються в якості зразкових джерел шумових напруг з рівномірною спектральною густиною, бо для них характерне хороше співпадіння результатів вимірювань з розрахунковими даних, отриманими за формулою Найквіста,.

З генераторів шуму на напівпровідникових приладах найбільш часто застосовуються генератори шуму на лавинно-пролітних діодах (ЛПД), що дозволяють отримувати досить високі потужності шуму в діапазоні НВЧ (дециметровий і сантиметровий діапазони). Вони можуть працювати і в режимі неперервних коливань і в режимі імпульсної модуляції, з тривалістю імпульсу від частки мікросекунд і більше.

Знаходять застосування в якості первинних джерел шуму також напівпровідникові стабілітрони в режимі, близькому до лавинного пробою, і тунельні діоди, які зазвичай використовуються в якості джерел шуму в діапазоні низьких і високих частот.

Вакуумні шумові діоди, що працюють в режимі насичення, мають шумові властивості, які засновані на явищі дробового ефекту - нерівномірного у часі вильоту електронів з поверхні розжареного катоду, і можуть служити широкосмуговими джерелами шуму в діапазоні частот від сотень Гц до 300...400 МГц.

Газорозрядні шумові трубки (ГШТ) широко застосовуються в якості первинного джерела в НВЧ діапазоні (сантиметрові і міліметрові хвилі). ГШТ мають високу рівномірність спектральної густини шуму в широкому діапазоні частот, стабільний і відносно високий рівень потужності, мають високу експлуатаційну надійність. Властивість ГШТ генерувати шуми обумовлена коливаннями електронів у плазмі газового розряду. Значення розрядного струму зазвичай лежать в межах 30...150 мА, його зміна впливає на шумову потужність. Газорозрядні генератори шуму випускаються у хвилеводному, коаксіальному і смужковому варіантах.

Перетворювач. У генераторах шуму в якості перетворювачів спектра використовуються підсилювачі, фільтри, нелінійні пристрої (обмежувачі), гетеродинні перетворювачі спектра – в залежності від того, яке перетворення спектра потрібно. Наприклад, застосовуючи в якості перетворювача фільтр, можна отримати з генератора білого шуму генератор стаціонарного випадкового процесу, що має спектральну густину, що змінюється за заданим законом у певній смузі частот. Для акустичних випробувань використовуються ФНЧ, що мають крутість спаду АЧХ (6...12) дБ/октава, і утворюють так званий «рожевий» шум.

Вимірювачі рівня сигналу. В якості вимірювачів рівня вихідного сигналу генератора шуму застосовуються вольтметри середньоквадратичного значення напруги, або вимірювачі середньої потужності шуму.

Вихідний блок. Його основним елементом служить калібрований атенюатор, що забезпечує однаковий коефіцієнт передавання потужності у всій заданій смузі частот шуму.

13.9 ГЕНЕРАТОРИ ШУМОПОДІБНИХ КОЛИВАНЬ

На даний час в системах передачі дискретних повідомлень, системах мобільного зв'язку, радіолокаційних системах широко застосовуються сигнали із заданими кореляційними і спектральними властивостями, які мають спектральні характеристики, близькі до білого шуму в широкій смузі частот. Внаслідок періодичності і детермінованості ці сигнали називають шумоподібними (псевдовипадковими) сигналами (ШПС). ШПС дозволяють ущільнити перевантажені частотні діапазони, а також забезпечити потайність передачі інформації або абонентських переговорів.

У зв'язку з цим все більше поширення отримують вимірювальні генератори шумоподібних коливань, що виконують елементи цифрової техніки. Порівняно з генераторами, в основі яких лежать фізичні прилади, подібні генератори мають ряд переваг, оскільки в них використовуються програмовані властивості коливань. До них відносяться: можливість точного визначення статистичних характеристик генерованого коливання, точного контролю частоти, сталість його середньоквадратичного значення (середньої потужності) в часі і в широкій смузі частот, відсутність дрейфу тощо.

Найбільш просто можна отримати двійкові псевдовипадкові коливання, що мають тільки два можливих рівня (1 і 0). Шумо - подібне коливання генерується у вигляді двійкової послідовності імпульсів. В цих послідовностях перемикавання з одного рівня на інший можуть відбуватися через інтервали часу $n\Delta t$, де Δt - період синхронізувальної послідовності імпульсів, n - псевдовипадкове число, що формується за прийнятим алгоритмом. Послідовність повторюється через період $T = N\Delta t$, де N - число елементів в одному періоді. Внаслідок періодичного характеру двійкового псевдовипадкового коливання, його автокореляційна функція (АКФ) змінюється лінійно має вигляд періодичної послідовності піків, серед яких є пік, амплітуда якого перевищує решту піків у $\sim N$ разів.

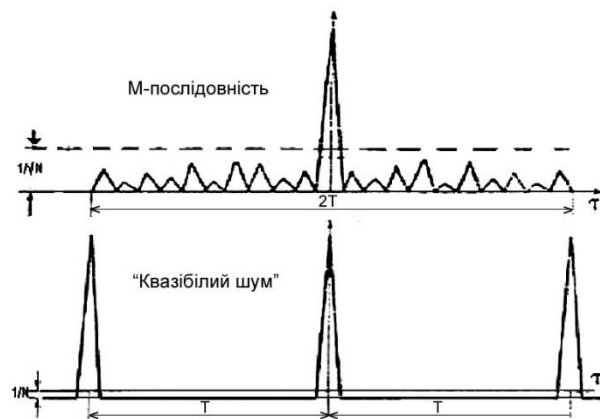


Рис. 13.8. АКФ М-последовательности

Найбільш ефективні коливання формуються у вигляді М-последовательностей. М-последовательності мають такі основні властивості:

- вона являє собою двійкову псевдовипадкову послідовність максимальної довжини, яку можна сформувати регістром зсуву, що має m розрядів;
- АКФ М-последовательності має форму, схожу з АКФ квазібілого шуму з обмеженим спектром (Рис. 13.8);
- відношення рівня головного максимуму до максимального значення бічних пелюсток АКФ наближено росте до \sqrt{N} ;
- кількість одиниць у кожному періоді становить $\frac{N}{2} + 1$, а кількість нулів - $\frac{N}{2} - 1$.

M-послідовність формується (генерується) m-розрядним двійковим регістром зсуву, охопленим зворотним зв'язком через суматор за модулем 2 (Рис. 13.9).

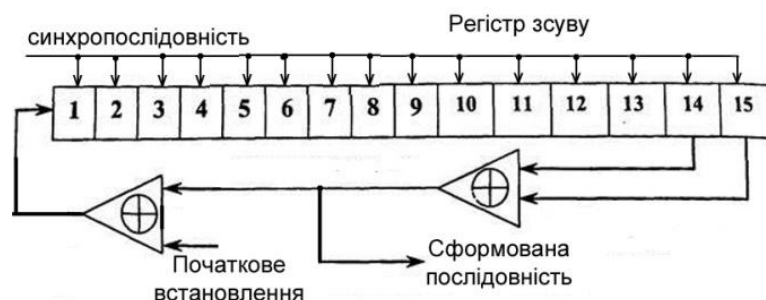


Рис. 13.9. Генератор M-послідовності

Для запуску генератора використовується код, який можна періодично змінювати, додаючи таким чином додаткової «випадковості» сформованому коливанню.

13.10 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. За рахунок яких заходів забезпечується стабільність частоти вимірювальних генераторів?
2. Які методи формування низькочастотних коливань у вимірювальних генераторах?
3. Опишіть структурну схему вимірювального генератора і призначення його функціональних блоків.
4. Опишіть принцип дії синтезатора частоти.
5. Які властивості псевдовипадкових імпульсних послідовностей?

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Захарченко О.С., Смирнов В.П. Метрологія та радіовимірювання. Конспект лекцій. (електронне видання). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 132 с.
2. Вікіпедія — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D0%B6%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8C_\(SI\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D0%B6%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8C_(SI)) — Назва з екрана
3. Н.М.Піндус. Основи метрології та інформаційновимірювальних технологій. Конспект лекцій. - ІваноФранківськ: Факел, 2010.- 345 с.
4. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 151 с.
5. Метрологія, стандартизація та управління якістю Л.П. Клименко, Л.В. Пізінцалі, Н.І. Александровська, В.Д. Євдокимов – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011
6. Метрологія, стандартизація, сертифікація : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л. М. Віткін, О. І. Момот, В. У. Ігнаткін, О. В. Мирошниченко, Н. В. Городничук, П. І. Самойлов; Ун-т економіки та права "КРОК". - К., 2011. - 301 с. - укр.
7. Планування експериментів і обробка їх результатів : навч. посіб. / В. У. Ігнаткін, О. В. Рязанцев, О. М. С'янов, В. А. Литвиненко; Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. - Дніпродзержинськ, 2010. - 156 с. - Бібліогр.: 10 назв. - укр.
8. Радіовимірювання: навчальний посібник до лабораторних робіт та контрольні завдання (для студентів спеціальності "Радіотехніка" всіх форм навчання) укл. : О.Г. Хандожко.- Чернівецький національний університет, 2011.- 67 с.
9. Електричні і радіотехнічні вимірювання : Посібник для пед. працівників та учнів професійно-техн. навч. закладів / А.М. Гуржій, Н.І. Поворознюк. - Київ : Навчальна книга, 2002. - 287 с.