

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# **МЕТРОЛОГІЯ**

## **конспект лекцій**

для здобувачів вищої освіти СВО «Бакалавр» освітньої спеціальності  
152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» денної форми  
навчання

**Миколаїв  
2021**

УДК 006.91  
М54

Друкується за рішенням науково-методичної комісії факультету ТВШПТСБ Миколаївського національного аграрного університету від 18.03.2021 р., протокол № 8.

**Укладачі:**

**Л. С. Патрєва** - доктор с.-г. наук, професор, завідувач кафедри птахівництва, якості та безпечності продукції, Миколаївський національний аграрний університет;

**І. В. Каницька** – асистент кафедри птахівництва, якості та безпечності продукції Миколаївського національного аграрного університету.

**Рецензенти:**

**Г. А. Коцюбенко** – доктор с.-г. наук, доцент кафедри птахівництва, якості та безпечності продукції Миколаївського національного аграрного університету;

**Л.О. Стріха** - кандидат с.-г. наук, доцент кафедри технології переробки, стандартизації та сертифікації продукції тваринництва Миколаївського національного аграрного університету.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	5
<b>ЛЕКЦІЯ 1. МЕТРОЛОГІЯ – НАУКА ПРО ВИМІРЮВАННЯ</b>	6
1. Метрологія – наука про вимірювання	6
2. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»	7
3. Основні терміни в галузі метрологічної діяльності	10
<b>ЛЕКЦІЯ 2. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ВИМІРЮВАННЯ</b>	14
1. Поняття фізичної величини	14
2. Одиниці фізичних величин. Система одиниць СІ	15
3. Розмірність та значення фізичної величини	17
<b>ЛЕКЦІЯ 3. ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ</b>	20
1. Шкали вимірювання	20
2. Еталони одиниць фізичних величин	22
3. Систематизація фізичних величин	24
<b>ЛЕКЦІЯ 4. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН</b>	25
1. Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину	25
2. Загальна класифікація вимірювань	27
3. Принцип і методи вимірювань	31
4. Значущість вимірювань	33
<b>ЛЕКЦІЯ 5. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ</b>	34
1. Похибки вимірювання. Класифікація похибок	34
2. Правила округлення результатів вимірювання і значень похибки	36
3. Знаходження систематичної похибки за класом точності засобу вимірювання	36
4. Випадкова похибка	37
<b>ЛЕКЦІЯ 6. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ</b>	39
1. Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки	39
2. Вимірювальні прилади	41
3. Структурні схеми вимірювальних приладів та систем	42
4. Аналогові та цифрові вимірювальні прилади	43
<b>ЛЕКЦІЯ 7. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗВТ</b>	45
1. Характеристики засобів вимірювальної техніки	45
2. Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками	50
<b>ЛЕКЦІЯ 8. КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ</b>	51
1. Калібрування засобів вимірювальної техніки та устаткування. Перевірка та калібрування вимірювальної техніки: схожість та відмінність	51
2. Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки.	52
3. Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки.	55
<b>ЛЕКЦІЯ 9. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ І ПІДСИЛЮВАЧІ</b>	58
1. Вимірювальні перетворювачі електричних величин. Загальні положення	59

2. Резистивні перетворювачі. Подільники напруги	62
3. Вимірювальні трансформатори струму та напруги	64
4. Вимірювальні підсилювачі	65
<b>ЛЕКЦІЯ 10. МІРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ</b>	68
1. Міри фізичних величин. Загальні положення. Основні вимоги до мір фізичних величин	70
2. Міри електричного опору	68
3. Міри індуктивності та взаємної індуктивності	72
4. Міри ємності	73
<b>ЛЕКЦІЯ 11. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ І МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b>	75
1. Електромеханічні вимірювальні прилади	75
2. Магнітоелектричні вимірювальні прилади, загальні положення	76
3. Магнітоелектричні амперметри і вольтметри	78
4. Магнітоелектричні омметри	81
<b>ЛЕКЦІЯ 12. ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЕНСАТОРИ</b>	83
1. Вимірювальні мости постійного струму	83
2. Мости змінного струму	87
3. Метрологічні характеристики мостів	89
4. Компенсатори постійного струму	90
<b>ЛЕКЦІЯ 13. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b>	92
1. Цифрові вимірювальні прилади, загальні положення	92
2. Цифровий частотомір середніх значень	96
3. Цифровий фазометр миттєвих значень	97
4. Цифровий вольтметр часового-імпульсного перетворення	97
<b>ЛЕКЦІЯ 14. ОСЦИЛОГРАФИ</b>	100
1. Електронні осцилографи	100
2. Аналогові осцилографи	102
3. Цифрові осцилографи	103
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b>	106

Метрологія, як наука склалася у кінці XVIII сторіччя із встановлення першого еталону – еталону метра. Але знання про вимірювання є однією з найстаріших областей знань людства взагалі. По своїй суті будь-яке вимірювання – це порівняння. Порівняння з чимось, що можна вважати мірою в конкретному випадку. Фактично, метрологія стала основою математики, алхімії, астрономії. А згодом дала розвиток багатьом фундаментальним і прикладним наукам відомим людству сьогодні.

До напрямків метрології, що знайшли застосування при забезпеченні якості промислової продукції, відносяться:

- 1) розробка загальної теорії вимірів;
- 2) розробка шляхів вимірювання, а також методів установалення точності й вірності вимірювання;
- 3) забезпечення цілісності вимірювання;
- 4) визначення одиниць фізичних величин.

При підготовці фахівців інженерних спеціальностей вивчення основ метрології, особливостей проведення вимірювань у галузях, відповідних спеціальності, має велике значення.

У даному виданні розглянуті етапи розвитку та еволюція метрології, викладено основні поняття метрології, види і методи вимірювань, особлива увага приділена міжнародним метрологічним організаціям і державній метрологічній службі України, охоплює загальні питання метрології та електричних вимірювань, похибок та невизначеності вимірювань, параметрів електровимірювальних приладів, масштабних перетворювачів струму і напруги та вимірювання параметрів електричних кіл. Окремо приділена увага таким аналоговим електровимірювальним приладам, як лічильники енергії та осцилограф. Докладно розглянуті методи оцінювання похибок результатів вимірювання за допомогою електровимірювальних приладів, а також окремі методи вимірювання потужності.

## **МЕТРОЛОГІЯ – НАУКА ПРО ВИМІРЮВАННЯ**

1. Метрологія – наука про вимірювання
2. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»
3. Основні терміни в галузі метрологічної діяльності

### **1. Метрологія – наука про вимірювання**

Метрологія виникла як наука про різні міри і співвідношення між ними. Слово метрологія утворено з двох грецьких слів: «метро» – міра і «логос» – вчення, що буквально можна перекласти як «вчення про міри».

Виміри є одним з найважливіших шляхів пізнання природи, дають кількісну характеристику оточуючого світу, допомагають розкрити діючі в природі закономірності. Д. І. Менделєєв, підкреслюючи значення вимірювання для науки, писав, що «наука починається відколи починають вимірювати – точна наука неможлива без міри».

Виміри грають величезну роль в сучасному суспільстві. Наука і промисловість не можуть існувати без вимірювання. Кожну секунду у світі відбувається багато мільярдів вимірювальних операцій, результати яких використовуються для забезпечення належної якості і технічного рівня продукції, що випускається, безпечної і безаварійної роботи транспорту і промисловості, для медичних і екологічних діагнозів і інших важливих цілей. Практично немає жодної сфери діяльності людини, де б інтенсивно не використовувалися результати вимірювання, випробувань і контролю. Для їх отримання задіяні мільйони людей і великі фінансові кошти. За оцінками експертів 15% громадської праці витрачається на проведення вимірювання.

Значимість вимірювання визначається тим, що тільки шляхом вимірювання необхідних фізичних величин, параметрів і показників можна отримати достовірну початкову інформацію, що становить основу будь-якої форми управління, аналізу, прогнозування, планування, контролю або регулювання. Причому, правильність рішень, які приймаються, може бути забезпечена тільки при високій і гарантованій точності результатів вимірювання.

З 1 січня 2001р. на території України і країн СНД замість ГОСТ 16263-70 введені рекомендації РМГ 29-99, які містять основні терміни і визначення в області метрології, узгоджені з міжнародними стандартами ISO, що регламентують використання одиниць вимірювання. Згідно РМГ 29-99 і ДСТУ 2681-94: «Метрологія – наука про виміри, методи і засоби забезпечення їх єдності і способи досягнення необхідної точності».

Предметом метрології є витяг шляхом вимірювання кількісної інформації про властивості об'єктів і процесів із заданою точністю і достовірністю. Найважливішим завданням метрології є розробка методів і засобів вимірювання, а також забезпечення єдності вимірювання, яка вирішується при дотриманні двох умов: вираз результатів вимірювання в узаконених одиницях і встановлення допустимих похибок результатів вимірювання і меж, за які вони не повинні виходити, при заданій імовірності. Похибки вимірювання вказуються в паспорті, технічних умовах (ТУ) та іншій нормативній документації, що надається засобу вимірювання.

Об'єктами метрології є одиниці фізичних величин, засоби і методи вимірювання, методики виконання вимірювання, еталони.

Метрологія ґрунтується на трьох китах, першим з яких є філософія. Глибокий філософський сенс вимірювання полягає в тому, що вони є одним з шляхів пізнання світу, органічно пов'язаним із спостереженням і експериментом. Виміри разом із спостереженням і експериментом утворюють емпіричну основу пізнання. Вони є найважливішим елементом віддзеркалення об'єктивно існуючих співвідношень між реальними об'єктами. У своєму розвитку метрологія пройшла шлях від «опису всякого роду мір по їх найменуваннях і взаємному співвідношенню» (Ф. І. Петрушевський) до точної науки про виміри. Ставши точною наукою, метрологія базується на відповідному математичному апараті. Отже, математика є другим «китом». Третім «китом», на якому стоїть метрологія, являються прикладні науки: для техніки – відповідні галузі фізики, для вивчення громадських явищ – соціологія, для вивчення людини – психологія і т. п.

Для забезпечення науково-технічного прогресу метрологія повинна випереджати у своєму розвитку інші галузі науки, тому що для кожної з них точні виміри і достовірна інформація є засадничими.

## **2. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»**

Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» регулюються документи про метрологію та метрологічну діяльність, відносини у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Метрологія відрізняється від інших природничих наук тим, що її фундаментальні положення приймаються за угодами, а не диктуються об'єктивними закономірностями. Це підкреслює наявність так званої **законодавчої метрології** – частини метрології, що містить положення, правила, вимоги та норми, які регулюються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань.

Метрологія є **теоретичною основою** вимірювальної техніки, одного з основних факторів технічного прогресу в усіх галузях діяльності людини. **Організаційною основою** метрології є метро-логічна служба України. **Нормативною основою** метрології є державні стандарти, відповідні нормативні документи Держстандарту України, методичні вказівки та рекомендації.

Сферою законодавчо регульованої метрології є визначені цим Законом види діяльності, щодо яких з метою забезпечення єдності вимірювань та простежуваності здійснюється державне регулювання стосовно вимірювань, одиниць вимірювання та засобів вимірювальної техніки.

До сфери законодавчо регульованої метрології належать такі види діяльності:

- 1) забезпечення захисту життя та охорони здоров'я громадян;
- 2) контроль якості та безпечності харчових продуктів і лікарських засобів;
- 3) контроль стану навколишнього природного середовища;
- 4) контроль безпеки умов праці;
- 5) контроль безпеки дорожнього руху та технічного стану транспортних засобів;

6) топографо-геодезичні, картографічні та гідрометеорологічні роботи, роботи із землеустрою;

7) торговельно-комерційні операції та розрахунки між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі під час надання транспортних, побутових, комунальних, телекомунікаційних послуг, послуг поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо);

8) роботи, пов'язані з визначенням параметрів будівель, споруд і території забудови;

Метрологічна система України включає:

- національну метрологічну службу;
- нормативно-правову базу, у тому числі законодавчі акти, технічні регламенти та інші нормативно-правові акти, що регулюють відносини у сфері метрології та метрологічної діяльності;
- національну еталонну базу та систему передачі розмірів одиниць вимірювання;
- систему добровільної акредитації калібрувальних лабораторій, а також систему акредитації випробувальних лабораторій, органів з оцінки відповідності у випадках, визначених цим та іншими законами України;
- навчальні заклади, науково-дослідні установи, організації, що поширюють знання та досвід у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Діяльність, пов'язану із забезпеченням функціонування та розвитку метрологічної системи України, координує центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності.

До національної метрологічної служби належать:

- 1) центральний орган виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності;
- 2) центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності;
- 3) центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрологічного нагляду;
- 4) наукові метрологічні центри;
- 5) Служба єдиного часу і еталонних частот, Служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів, Служба стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів;
- 6) метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, інших державних органів, підприємств та організацій;
- 7) органи з оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки та повірочні лабораторії.

Центральний орган виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності, здійснює державне управління забезпеченням єдності вимірювань в Україні.



До повноважень центрального органу виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності, належать:

- забезпечення нормативно-правового регулювання у сфері метрології та метрологічної діяльності;
- організація проведення фундаментальних досліджень у сфері метрології;
- забезпечення функціонування та вдосконалення національної еталонної бази;
- розроблення або участь у розробленні державних наукових і науково-технічних програм, що стосуються забезпечення єдності вимірювань;
- представництво та участь від України в діяльності міжнародних, європейських та інших регіональних організацій з метрології;
- здійснення інших повноважень, визначених законами та покладених на нього актами Кабінету Міністрів України.

Центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності

До повноважень центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, належать: координація діяльності щодо забезпечення функціонування метрологічної системи України; організація функціонування та підготовка пропозицій з удосконалення національної еталонної бази; уповноваження на проведення перевірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації; здійснення інших повноважень, визначених законами та покладених на нього актами Кабінету Міністрів України.

Наукові метрологічні центри визначаються Кабінетом Міністрів України з числа державних підприємств, установ та організацій, що належать до сфери управління центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, і створюють, удосконалюють, зберігають і застосовують національні еталони.

Положення про наукові метрологічні центри затверджуються центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Наукові метрологічні центри у сферах діяльності, визначених положеннями про них та нормативно-правовими актами:

1) здійснюють фундаментальні наукові дослідження у сфері метрології, а також виконують роботи, пов'язані з розробленням та реалізацією державних програм з метрології та концепції розвитку метрологічної системи України;

2) здійснюють науково-прикладні дослідження та виконують науково-дослідні роботи, пов'язані із створенням, удосконаленням, зберіганням, звіренням, застосуванням національних еталонів, створенням систем передачі розмірів одиниць вимірювання;

3) беруть участь у розробленні проектів технічних регламентів, інших нормативно-правових актів, а також нормативних документів у сфері метрології та метрологічної діяльності;

4) здійснюють координацію та науково-методичне супроводження робіт із забезпечення єдності вимірювань за відповідними напрямками діяльності;

- 5) проводять оцінку відповідності засобів вимірювальної техніки;
- 6) проводять калібрування та перевірку засобів вимірювальної техніки;
- 7) проводять вимірювання у сфері законодавчо регульованої метрології;
- 8) ведуть інформаційний фонд за напрямками своєї діяльності;
- 9) здійснюють міжнародне співробітництво з питань, що належать до їх компетенції.

### **3. Основні терміни в галузі метрологічної діяльності**

Основними термінами, якими оперує метрологія є фізична величина, одиниця фізичної величини, передавання розмірів фізичної величини, засоби вимірювальної техніки, метод вимірювання, методика вимірювання, результат вимірювання, похибка вимірювання, метрологічне забезпечення вимірювань, метрологічна служба, метрологічна перевірка та атестація засобів вимірювальної техніки. Важливими суб'єктами метрології, як науки, є предмет її вивчення, а також методи і засоби метрології.

**Предмет метрології** – це отримання кількісної та якісної інформації про властивості фізичних об'єктів і процесів, встановлення та застосування наукових організаційних основ, розроблення технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірювань.

**Методи метрології** – це сукупність фізичних і математичних методів, які використовуються для отримання вимірювальної інформації. До методів метрології належать: планування та організація вимірювального експерименту, методи і методики вимірювань, методи відтворення, зберігання та передавання одиниць фізичних величин, методи вимірювальних перетворень сигналів, опрацювання результатів вимірювань.

**Засоби метрології** – це сукупність засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для підготовки та здійснення експерименту, а також системи організації метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки. До засобів метрології належать:

- еталони одиниць фізичних величин;
- стандартні зразки складу і властивостей речовин та матеріалів; - робочі засоби вимірювальної техніки;
- система метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки під час їх виробництва, застосування та ремонту. Як наука про вимірювання, метрологія є частиною технічної фізики, мета якої – це вирішування науково-теоретичної проблеми вимірювальної техніки.

Розвиваючись швидкими темпами, метрологія ділиться на ряд самостійних розділів: теорія вимірювань; теорія похибок; інформаційна теорія вимірювань; теорія інформаційно-вимірювальних систем; статистичні вимірювання; вимірювання електричних величин; вимірювання магнітних величин; вимірювання неелектричних величин.

Вимірювальна техніка є одним із головних факторів технічного прогресу, і її рівень значною мірою визначає загальний рівень розвитку науки і техніки. Особлива роль належить електровимірювальній техніці, яка дозволяє використовувати новітні досягнення електротехніки, електроніки, обчислювальної техніки і автоматики для вирішення складних науково-технічних завдань.

Методи вимірювання електричних величин застосовуються також для вимірювання неелектричних і магнітних величин. Засоби вимірювання електричних та неелектричних величин застосовуються не тільки для отримання вимірювальної інформації, але і для здійснення контролю за станом параметрів різноманітних матеріальних об'єктів.

Однією з найважливіших характеристик вимірювань є точність, яка характеризує міру відповідності наукового знання про досліджувані об'єкти теорії, сформульованого з використанням кількісних відношень, що отримані в процесі вимірювального експерименту. Тому точність на кожному етапі розвитку науки і техніки є кінцевою.

Прагнучи до пізнання світу та підвищення продуктивності праці, людина в процесі накопичення знань та досвіду розробляє методи пізнання – найбільш ефективні засоби одержання нових знань.

Вимірювальна інформація – одна із складових частин пізнання людиною матеріального світу за допомогою експериментальних методів пізнання. Експериментальна інформація безперервно вдосконалюється у процесі покращення вимірювального експерименту. При цьому відбуваються постійне уточнення вимірювальної інформації, вивільнення її від супутніх похибок і наближення до абсолютної істини. В результаті аналізування отриманої вимірювальної інформації людина пізнає навколишнє середовище.

До методів експериментальної інформатики відносять: сприйняття, порівняння, відтворення, спостереження, контроль, вимірювання, розпізнавання образів, діагностику, ідентифікацію, випробування та експериментальні дослідження.

Сприйняття – це відображення найпростіших характеристик довколишнього середовища органами почуття людини або спеціальними технічними засобами (сенсорами, індикаторами) – сигналами, зручними для подальшого використання.

Порівняння – це відображення подібності чи відмінності об'єктів логічним висновком. Відомо, що більшість матеріальних об'єктів виявляють себе одночасно у двох відношеннях, а саме еквівалентності і порядку. Відповідно, і порівняння об'єктів здійснюється за еквівалентністю та за інтенсивністю, тобто за розміром.

Відтворення у метрології – це створення матеріальних об'єктів, що характеризуються фізичною величиною наперед заданого значення за допомогою спеціального технічного засобу, який називають мірою.

Спостереження – це відображення властивості, залежності, стану або ситуації словесним чи графічним описом. Спостереження є таким методом пізнання, який здійснюється за допомогою як органів почуття людини, так і спеціальних технічних засобів. Спостереження – це складова частина всіх експериментальних методів пізнання. Як метод пізнання спостереження має задовольняти таким основним вимогам: планомірність, цілеспрямованість й систематичність.

Вимірювання – це відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання є комплексною інформаційною процедурою, що

ґрунтується на використанні щонайменше двох методів пізнання: відтворення і порівняння.

Контроль – це відображення відповідності між станом об'єкта і заданою нормою відповідним висновком (придатний чи непридатний). В техніці переважає контроль фізичних величин та параметрів процесів. Контроль параметрів – це відображення співвідношення між контрольованим параметром та нормою.

**Випробування** – це відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом. **Експериментальні дослідження** – це відображення складного матеріального об'єкта або ситуації, що характеризується сукупністю взаємопов'язаних величин, системою відповідних моделей. Важливе місце серед експериментальних методів пізнання займають вимірювання, за допомогою яких отримують необхідну кількісну та якісну інформацію. Наявність вимірювальної інформації про об'єкт дослідження дає можливість більш ефективно використовувати усі інші експериментальні методи пізнання – від спостереження до експериментального дослідження.

Існують три основні складові метрології, як науки: *науково-теоретична метрологія, законодавча метрологія та прикладна метрологія.*

Науково-теоретична метрологія - розробка та удосконалення теоретичних основ метрології; - розробка нових принципів та методів вимірювань, проведення фізичних досліджень з метою використання найновіших досягнень науки для створення нових методів вимірювань та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), підвищення точності вимірювань; - створення та удосконалення наукових основ єдності мір та вимірювань, створення наукових основ державних випробувань вимірювальних засобів, розробка та удосконалення нормативної документації в галузі вимірювальної техніки; - створення та удосконалення наукових основ державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків, розробка і удосконалення системи збору, апробації, зберігання та поширення стандартних довідкових даних.

Законодавча метрологія - узаконення (стандартизація) термінів та їх означень, систем та сукупності одиниць, системи еталонів, мір фізичних величин та ЗВТ; - узаконення класів точності ЗВТ та методик оцінювання їх точності, а також стандартних довідкових даних, методик перевірки та контролю ЗВТ, методик оцінювання відповідності та контролю якості продукції.

Прикладна метрологія - організація державної служби єдності мір та вимірювань, організація та здійснення періодичної повірки ЗВТ, які знаходяться в експлуатації, а також здійснення державних випробувань нових ЗВТ, контроль за станом вимірювального господарства підприємств; - організація та налагодження роботи служби контролю за до-триманням стандартів та технічних умов під час виробництва, випробувань, контролю якості та оцінювання відповідності продукції; - організація державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків, видання офіційних довідників зі значеннями констант та властивостей речовин і матеріалів, виготовлення та випуск стандартних зразків та організація служби їх атестації.

**ЛЕКЦІЯ 2**  
**ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ВИМІРЮВАННЯ**

1. Поняття фізичної величини
2. Одиниці фізичних величин. Система одиниць СІ
3. Розмірність та значення фізичної величини

## 1. Поняття фізичної величини

У науці, техніці і повсякденному життю людина має справу з різноманітними властивостями оточення нас фізичних об'єктів. Одна і та ж властивість може бути виявлена у багатьох об'єктів або бути властивим тільки деяким з них. У зв'язку з цим виникла необхідність ідентифікувати властивості, присвоївши їм найменування (довжина, маса, об'єм.). Кожен фізичний об'єкт може бути описаний за допомогою різних властивостей, властивих цьому об'єкту. Властивість – категорія якісна, виражає відмінність або спільність з іншими об'єктами. Будь-яка властивість може бути вимірною.

Для кількісного опису різних властивостей, процесів і фізичних тіл вводиться поняття величини. Величина – це властивість чого-небудь, яке може бути виділене серед інших властивостей і оцінене тим або іншим способом, у тому числі і кількісно.

Величина не існує сама по собі, вона має місце, поки існує об'єкт з властивостями, вираженими цією величиною. Аналіз величин дозволяє розділити їх на два види: реальні і ідеальні.

Ідеальні величини відносяться до області математики, і метрологія як наука ними не займається, хоча і використовує в практиці обробки результатів вимірювання. Ідеальні величини можуть бути обчислені тим або іншим способом і за певних умов, можуть не мати похибки обчислення, чого не можна сказати про величини реальні.

Реальні величини діляться на фізичні і нефізичні. Фізична величина може бути визначена як величина, властива матеріальним об'єктам (процесам, явищам), що вивчаються в природних (фізика, хімія) і технічних науках.

До нефізичних відносяться величини, властиві громадським наукам – філософії, соціології, економіці, управління якостю, інформатиці тощо. Нефізичні величини, для яких одиниця вимірювання в принципі не може бути введена, можуть бути оцінені з використанням експертних оцінок, бальної системи, набору тестів.

Нефізичні величини, при оцінці яких неминучий вплив суб'єктивного чинника, так само, як і величини ідеальні, до області метрології не відносяться.

Метрологія як наука займається фізичними величинами. Фізичні величини розділяють на вимірювані і оцінювані. Вимірювані ФВ виміряні технічними засобами вимірювання, виражені кількісно в певних одиницях вимірювання.

Фізичні величини, для яких не може бути введена одиниця вимірювання, можуть бути тільки оцінені.

Оцінювання величини здійснюється за допомогою натуральних шкал, наприклад, твердість мінералів за шкалою Мооса, сила вітру за натуральною шкалою Бофорта.

Стандарт ДСТУ 2681-94 визначає, що фізична величина – це властивість, загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкту.

Кожна ФВ має свої якісну і кількісну характеристики. Якісна характеристика визначає «рід» величини (маса, температура, щільність, довжина.), виражаючи відмінність або спільність з іншими величинами.

Кількісна характеристика визначає розмір вимірюваної величини (довжина конкретного предмета, щільність конкретного предмета).

Наприклад, властивість «міцність» в якісному відношенні характеризує такі матеріали, як сталь, дерево, тканина, скло і багато інших, тоді як міра (кількісне значення) міцності – величина для кожного з них абсолютно різна.

Фізична величина – це властивість явища чи тіла, яка може бути розрізнена якісно і ви-значена кількісно. Якщо фізична величина змінюється в часі, то говорять про *фізичний процес*. Наприклад, зміна напруги на затискачах обмотки трансформатора. Якщо фізична величина змінюється лише у просторі, то говорять про *стаціонарне фізичне поле*. Наприклад, напруженість магнітного поля у різних місцях земної кулі. Якщо фізична величина змінюється як у часі, так і в просторі, то говорять про фізичне поле. Прикладом може бути температурне поле в приміщенні, де температура в різних місцях у певний момент часу різна і змінюється упродовж доби.

*Рід фізичної величини* – це якісна означеність фізичної величини. Розрізняють однорідні та різнорідні фізичні величини. Наприклад, діаметр і висота циліндра – це однорідні величини – величини довжини. Однак маса і об'єм стрижня – це різнорідні величини. Для забезпечення можливості однозначної інтерпретації виразів математики, які описують будь-які взаємозалежності між фізичними величинами під час їх вимірювань, рекомендується застосовувати однакові позначення фізичних величин у різних галузях науки, техніки та у підручниках.

Кількісною характеристикою фізичної величини є розмір вимірювальної величини. Електричні струми, що протікають в біологічних тканинах живих організмів, при заряді акумулятора і розряді блискавки, відображають одну і ту саму фізичну властивість, але кількісно відрізняються. Тобто *розмір величини* відображає об'єктивну кількість певної властивості, яка притаманна конкретному об'єкту незалежно від того, вимірюється ця величина чи ні.

Під час вимірювань знаходять експериментальну наближену оцінку розміру – значення величини. *Значення вимірюваної величини  $X$*  – це експериментальна оцінка її розміру  $x$  у вигляді деякої кількості  $Nx$  значень однорідної з нею величини  $q$ , яка має назву *одиниця вимірювання*.

## 2. Одиниці фізичних величин. Система одиниць СІ

Одиниця фізичної величини згідно з ДСТУ 2681 – 94 – це певний розмір величини, прийнятий за угодою Генеральної конференції з мір та ваги для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Суть вимірювання полягає у порівнянні розміру вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю.

Об'єктом вимірювання є фізичні величини, які прийнято ділити на основні і похідні.

Основні величини не залежать одна від одної, але вони можуть служити основою для встановлення зв'язків з іншими фізичними величинами: кг, м, с.

Похідні величини – фізичні величини, одиниці вимірювання яких складені з інших одиниць або вони можуть бути отримані за певною формулою, що показує залежність їх від інших фізичних величин: кг/м<sup>3</sup>; м/с<sup>2</sup>; м<sup>2</sup>.

Сукупність основних і похідних одиниць ФВ, утворена відповідно до прийнятих принципів, називається системою одиниць фізичних величин.

Розвиток метричної системи мір в різних галузях науки і техніки відбувався роз'єднано і призвів до появи багатьох систем одиниць фізичних величин і великої кількості позасистемних одиниць.

Можливість усунення різноманіття вживаних одиниць з'явилася після розробки Єдиної універсальної системи одиниць, що охоплює усі галузі науки і техніки. Ця система одиниць була прийнята XI Генеральною конференцією по заходах і вагах в 1960 р. і отримала найменування «Міжнародна система одиниць» – СІ (Система Інтернаціональна).

Міжнародна організація по стандартизації видала міжнародні стандарти ISO 31:1992 «Величини і одиниці», ISO 1000:1992 «Одиниці СІ і рекомендації по використанню їх кратних і деяких інших одиниць». В Україні система СІ офіційно була прийнята в 1963г.

Як основні величини прийняті: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль і кандела, які введені ДСТУ 3651.0-97 «Основні одиниці ФВ».

Похідні одиниці ФВ міжнародної системи одиниць введені стандартом ДСТУ 3651.1-97 «Похідні одиниці ФВ». Прикладами похідних одиниць, що мають спеціальну назву, є: герц – одиниця частоти; ват – одиниця потужності.

Єдність вимірювань – це такий стан вимірювань, при якому результати визначаються в чинних одиницях, а похибки відомі із завданою достовірністю.

Це все дозволяє співставляти результати вимірювань, які були отримані за допомогою різних ЗВ в різних місцях та у різний час.

У більшості країн світу заходи щодо забезпечення єдності вимірювань встановлено відповідними нормативно-технічними документами.

Для забезпечення знання похибок вимірювання із завданою достовірністю необхідне забезпечення одноманітності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

Чинні одиниці вимірювання відображенні в Системі Інтернаціональній (СІ), яка містить: 7 основних одиниць, 2 додаткові одиниці, 17 похідних одиниць.

Основні одиниці СІ:

1. Метр [м], [m] дорівнює відстані, яку долає у вакуумі пласка електромагнітна хвиля за  $1/299792458$  долю секунди.

2. Секунда [с], [s] шкала атомного часу (АТ) дорівнює  $9192631770$  періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атому Cs133.

3. Кілограм [кг], [kg] дорівнює вазі води при температурі  $4^{\circ}\text{C}$  (оскільки в цих умовах вода має максимальну густину), що вкладається в об'єм  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>.

4. Ампер [А], [A] дорівнює силі постійного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках безмежної довжини нехтовно малої площі поперечного перерізу, що знаходиться у вакуумі на відстані 1м один від одного, створює силу взаємодії у  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

5. Кельвін [К], [K] дорівнює  $1/273,16$  частині термодинамічної температури потрійної точки води.

6. Моль [моль], [mol] дорівнює кількості речовини, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів С12 у масі 0,012 кг.



7. Кандела [кд], [kd] дорівнює силі монохроматичного світла, що випромінюється на частоті  $540 \cdot 10^{12}$  Гц із силою  $1/683$  Вт/ср.

Додаткові одиниці

1. Радіан [рад], [rad] дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

2. Стерадіан [ср], [sr] дорівнює тілесному куту з вершиною у центрі сфери, що

вирізає на поверхні сфери площу, яка дорівнює площі квадрата із стороною в

радіус сфери.

Похідні одиниці – отримують за допомогою основних та додаткових.

Окрім того існують позасистемні одиниці. Наприклад, години, літри, градуси Цельсія, гектар, тонна, вольт-ампер, тощо.

Властивості СІ:

- універсальність (містить всі існуючі фізичні одиниці),
- когерентність (похідні одиниці можуть бути виражені через основні),
- має високу точність відтворення,
- частковість (це властивість поділення основних одиниць на частки,
- кратність (це властивість до отримання більшої величини).

**Позначення частковості та кратності Частковість**

**Кратність**

10 <sup>-1</sup> = 0,1 (деци-)	10 <sup>1</sup> = 10 (дека-)
10 <sup>-2</sup> = 0,01 (санті-)	10 <sup>2</sup> = 100 (гекто-)
10 <sup>-3</sup> = 0,001 (мілі-)	10 <sup>3</sup> = 1000 (кіло-)
10 <sup>-6</sup> = 0,000001 (мікро-)	10 <sup>6</sup> = 1000000 (мега-)
10 <sup>-9</sup> = 0,000000001 (нано-)	10 <sup>9</sup> = 1000000000 (гіга-)
10 <sup>-12</sup> = 0,000000000001 (піко-)	10 <sup>12</sup> = 1000000000000 (тера-)
10 <sup>-15</sup> = 0,000000000000001 (фемто-)	10 <sup>15</sup> = 1000000000000000 (пета-)
10 <sup>-18</sup> = 0,000000000000000001 (атто)	10 <sup>18</sup> 0000000000000000000 (екса-)

### 3. Розмірність та значення фізичної величини

Розмірність – якісна характеристика вимірюваної величини. Відображає зв'язок цієї величини з основними величинами і залежить від вибору останніх. Розмірність позначається символом  $\dim$ , що походить від слова *dimension*, яке залежно від контексту може переводитися як розмір і як розмірність.

Розмірність основних ФВ позначається відповідними заголовними буквами, наприклад:

- для довжини  $\dim l = L = [\text{м, км, мм.}]$ ;
- для маси  $\dim M = M = [\text{кг, гр, т.}]$ ;
- для часу  $\dim t = T = [\text{мін, з, година.}]$ .

Розмірність похідної ФВ ( $\dim Q$ ) – це вираження у формі степінного многочлена, що відображає зв'язок цієї фізичної величини з основними фізичними величинами,  $\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma$ ; де  $L, M, T$  – розмірність відповідних основних фізичних величин;  $\alpha, \beta, \gamma$  – цілі або дробові додатні або від'ємні дійсні числа.

Показник міри, в який зведена розмірність основної величини, називають показником розмірності. Якщо усі показники розмірності дорівнюють нулю, то

таку величину називають безрозмірною. Показник розмірності основної величини відносно самої себе дорівнює одиниці і не залежить від інших величин.

При визначенні похідних величин керуються наступними правилами:

1. Розмірність правої і лівої частини рівнянь мають бути однаковими, оскільки порівнюватися між собою можуть тільки однакові властивості.

2. Розмірність добутку декількох величин дорівнює добутку їх розмірності. Якщо залежність між величинами має вигляд  $Q=A \cdot B \cdot C$ , то  $\dim Q = \dim(A \cdot B \cdot C) = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C$ .

3. Розмірність частки при діленні однієї величини на іншу дорівнює відношенню їх розмірності, тобто  $Q=A/B$ , то  $\dim Q = \dim(A/B) = \dim A / \dim B$

4. Для величини, що підноситься до степеня, тобто  $Q=A^n$ , розмірність підноситься до того ж ступеня:  $\dim Q = \dim A^n = \dim n \cdot A$ .

Наприклад, електричний опір в 1 Вт – розмірність:

$\dim \rho = ML^{-3} = [кг/м^3, г/мм^3]$ ; електрична провідність в 1 См (сіменс) –  $\dim G = L^{-2}M^{-1}T^3I^2 = м^{-2}кг^{-1}с^3А^2$ .

Якщо сила, згідно з другим законом Ньютона,  $F=ma$ , де прискорення  $a=v/t$ , то  $\dim F = \dim m \dim a = ML/T^2 = LMT^{-2}$ .

Поняття розмірності широко використовується для переведення одиниць з однієї системи в іншу; для перевірки вірності складних розрахункових формул, отриманих в результаті теоретичного висновку; при з'ясуванні залежності між величинами.

Кількісною характеристикою вимірюваної величини служить її розмір. Отримання інформації про розмір ФВ є змістом будь-якого вимірювання. При цьому немає іншого експериментального способу отримати інформацію про які б то не було розміри, як виконати порівняння їх між собою. При вимірі за шкалою відношень або шкалою інтервалів виконується порівняння невідомого розміру з відомим, прийнятим за одиницю.

Одиниця вимірювання фізичної величини – це фізична величина фіксованого розміру, якій за визначенням умовно присвоєно числове значення, рівне одиниці і вживана для кількісного вираження однорідних з нею фізичних величин.

Значення вимірюваної фізичної величини – це оцінка її величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць або числа за прийнятою для неї шкалою. Абстрактне число, що входить в нього, називається числовим значенням. Воно показує на скільки одиниць вимірюваний розмір більше нуля або в скільки разів він більше одиниці вимірювання. Таким чином, значення вимірюваної величини  $Q$  можна виразити через основне рівняння вимірювання:  $Q = q[Q]$ ; де  $Q$  – істинне значення фізичної величини (результат вимірювання);  $q$  – числове значення ФВ;  $[Q]$  – одиниця вимірювання ФВ.

Наприклад, 120 мм – значення лінійної величини; 75 кг – значення маси тіла; НВ 190 – число твердості по Бринелю.

Одиниця вимірювання – це ФВ певного розміру, прийнята для кількісного відображення однорідних з нею величин. Якщо допустити довільність у виборі одиниць, то результати вимірювання виявляться непорівнянними між собою, тобто порушиться єдність вимірювання. Щоб цього не сталося, одиниці

вимірювання встановлюється за певними правилами, і закріплюються законодавчим шляхом.

### **ЛЕКЦІЯ 3 ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ**

1. Шкали вимірювання
2. Еталони одиниць фізичних величин
3. Систематизація фізичних величин

#### **1. Шкали вимірювання**

Виміром фізичної величини називають сукупність операцій, виконаних за допомогою технічних засобів, що зберігає одиницю, або відтворюючу шкалу фізичної величини, що полягає в порівнянні вимірюваної величини з її одиницею або шкалою з метою набуття значення цієї величини у формі, найбільш зручній для використання.

Шкала фізичної величини – впорядкована сукупність значень фізичної величини, що служить початковою основою для вимірювання цієї величини. Залежно від виду проявів властивостей фізичних об'єктів розрізняють п'ять основних типів шкал вимірювання.

Шкала найменувань (шкала класифікацій) – це найпростіший тип шкал, застосовують для властивостей, що проявляють себе тільки відносно еквівалентності, які у різних об'єктів можуть співпадати або не співпадати. За своєю суттю це якісна, а не кількісна шкала, не містить нуля і одиниць вимірювання.

По таких шкалах:

1) класифікують якісні властивості, визначувані за допомогою органів чуття людини (органолептичні). Наприклад, експертні оцінки запахів або оцінка кольору по найменуваннях (атлас кольорів, шкала кольорів). Процес вимірювання полягає у візуальному порівнянні забарвленого предмета з еталонним зразком. Виконує вимір досвідчений експерт, що має відповідні зорові можливості.

2) приписування якісним властивостям об'єктів чисел (знаків), що грають роль простих імен. Наприклад: один з резисторів позначений R5 інший R18. З цього не можна зробити висновок, що значення їх опору відрізняються в триє, можна лише встановити, що обоє вони відносяться до класу резисторів.

Шкала порядку (шкала рангів) – застосовують для властивостей, що проявляють себе відносно еквівалентності і порядку.

Застосовна для числового оцінювання величин за заздалегідь вибраними правилами, якщо відсутня одиниця величини, є ранжируваний ряд, впорядковану послідовність подій. Кожна з подій більше за попереднє. Оцінюється в балах по натуральних шкалах.

Основний недолік натуральних шкал – відсутність упевненості, що інтервали між вибраними опорними точками є рівновеликими, а отже, в такій шкалі неможливо вичленувати одиницю величини і оцінити похибку отриманої оцінки. Оскільки інтервали між балами невідомі, то ніякі математичні операції до цих шкал застосовуватися не можуть, застосовні тільки логічні. Порівнюючи однорідні об'єкти, ранжируваний ряд (в порядку убування, зростання) може дати відповідь на питання «що більше-менше», «краще-гірше», але, на скільки більше-менше; у наскільки, раз краще-гірше дати відповідь не може. Наприклад, шкала землетрусів, 12-бальна шкала Бофорта для оцінювання сили морського хвилювання, шкала в'язкості Енглера. Широкого поширення набули шкали порядку з нанесеними на них реперними точками. До таких шкал, наприклад, відноситься шкала Мооса для визначення твердості мінералів, яка містить 10 опорних мінералів з умовними числами твердості: 1-гальк, 2-гіпс, 3-кальцій, 4-флюорит, 5-апатит, 6-ортоклаз, 7-кварц, 8-топаз, 9-корунд, 10-алмаз. Віднесення мінералу до тієї або іншої міри твердості здійснюється на підставі дряпання випробовуваного матеріалу опорним матеріалом.

Шкала інтервалів (шкала різниць) застосовуються для властивостей, що проявляють себе відносно еквівалентності, порядку і адитивності.

Шкала інтервалів складається з однакових інтервалів  $i$ , як наслідок лінійна, має одиницю вимірювання і довільно вибраний початок – нульову точку. До таких шкал відноситься шкала інтервалів часу, температурні шкали.

Шкали інтервалів досконаліші оскільки дозволяють виконувати математичні дії:

– результати вимірювання складати один з одним і віднімати один з одного, тобто визначати, на скільки одне значення фізичної величини більше або менше іншого.

– складання і віднімання інтервалів (різниць), служать для вимірювання шляхом порівняння 2-х розмірів, порівнюючи в скільки разів один інтервал більше або менше іншого.

Розмір  $Q$  фізичної величини може бути визначений за шкалою інтервалів на підставі рівняння:  $Q = Q_0 + q [Q]$ ,

де  $Q_0$  – початок відліку шкали;  $q$  – числове значення величини;

$[Q]$  – одиниця вимірювання.

Основний інтервал можна виразити рівнянням:  $\Delta Q = Q_1 - Q_0$ .

Шкала відношень – застосовують для властивостей, що проявляють себе відносно еквівалентності, порядку і адитивності. Є інтервальною шкалою з природним початком відліку – нулем. Вона охоплює інтервал значень  $n$  від 0 до  $\infty$   $i$ , у відмінності від шкали інтервалів, не містить від'ємних значень, одиниці вимірювання встановлюються за погодженням.

За такою шкалою можна відлічувати абсолютне значення вимірюваної фізичної величини і визначати на скільки більше-менше; у скільки разів більше-менше за правилом:  $Q_1/Q_2 = n$ .

Шкала відношень є найдосконалішою, найбільш інформативною. Результати вимірювання за шкалою відношень можна складати між собою, віднімати, перемножувати і ділити.

Прикладами величин, для яких існують шкали відношень, є маса, довжина, сила електричного струму тощо.

Абсолютні шкали мають усі ознаки шкал відношень, але додатково в них існує природне однозначне визначення одиниці вимірювання, незалежне від прийнятої системи одиниць. Такі шкали відповідають відносним величинам: коефіцієнту посилення, послаблення, плоский або тілесний кут тощо. Для утворення багатьох похідних в системі СІ використовуються безрозмірні і рахункові одиниці абсолютних шкал.

## 2. Еталони одиниць фізичних величин

Однією із умов забезпечення єдності вимірювань є тотожність одиниць, в яких проградуєвані всі засоби вимірювальної техніки, що використовуються для вимірювання однієї і тієї самої фізичної величини. Це досягається точним відтворенням та зберіганням встановлених одиниць фізичних величин і передаванням їх розмірів відповідним засобам вимірювальної техніки. Відтворення та зберігання одиниць вимірювань для передачі їх розмірів засобом вимірювальної техніки, які застосовуються на території України, забезпечуються *державними еталонами*.

**Еталон** – це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниць фізичної величини, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки. В таблиці наведена характеристика різних видів еталонів. Складність різних еталонів і точність відтворюваних ними розмірів неоднакова.

Вимірювання контрольованої величини передбачає прийняття за еталон одного певного значення цієї самої величини. Для того, щоб уникнути застосування занадто великої кількості еталонів, головними є лише деякі з них, які мають назву основні (базисні), а решта - похідними.

Наприклад, у механіці базисними величинами є довжина, маса та час. Одиницями, що їх описують, є метр (*m*), грам (*g*), секунда (*s*). Відповідно в електромагнетизмі використовуються чотири базисні величини, три з яких механічні, а четверта - електрична, а саме, електричний струм з одиницею - ампер (*A*).

Таблиця 1

Вид еталона	Характеристика
Державний еталон	це офіційно затверджений еталон, що забезпечує відтворення одиниці фізичної величини та передачу її розміру іншим еталонам з найвищою в країні точністю.
Первинний еталон	це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою у країні точністю.
Спеціальні еталони	це еталон для відтворення одиниць в особливих умовах, в яких пряму передачу розміру одиниці від первинного еталона з необхідною точністю технічно здійснити неможливо.
Вторинний еталон	це еталон, якому передається розмір одиниці фізичної величини від первинного або спеціального еталона. До таких еталонів належать еталон-копія, робочі еталони та еталони передавання.
Еталон-копія	це вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини робочим еталонам, які використовуються для метрологічної перевірки зразкових та найточніших робочих засобів.
Робочий еталон	це вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини зразковим засобам вимірювальної техніки, а в окремих випадках-робочим засобам

	вимірювальної техніки, та який використовується для метрологічної повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки.
Еталон передавання	це вторинний еталон, призначений для взаємного звірення еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.
Одиничний еталон	це одна міра, один вимірювальний прилад або одна вимірювальна установка.
Національний еталон	це еталон певної країни.
Міжнародний еталон	це еталон, що використовується у певній групі країн. Згідно з ДСТУ 2681-94 такий еталон, який за міжнародною угодою призначений для узгодження розмірів одиниць, що відтворюються і зберігаються державними (національними) еталонами.

Розроблена та впроваджена міжнародна система одиниць, яка складається з семи базисних одиниць: метр, грам, секунда, ампер, кандела, кельвін та моль, а також двох допоміжних - стерadian та радіан.

Така система забезпечує цілісну метрологічну єдність всіх сучасних галузей науки й техніки та є такою, що ви-знана у більшості цивілізованих країн світу.

Слід відзначити, що для забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі державні еталони окремих країн періодично звіряють між собою з міжнародними еталонами, які зберігаються в Міжнародному бюро мір і ваг у Парижі. Порівняння вимірюваної величини з умовною прийнятою одиницею є справою, що потребує багато часу.

В наш час дослідниками створюються штучні еталони - зразки, а також підбираються природні явища, які достатньо точно відтворюють прийнятні одиниці. Від зразків вимагається достатня стабільність конкретної величини, її відтворюваність, простота використання за допомогою методик та приладів.

Отже, основне завдання метрологічної служби держави - це пов'язування еталона й зразків усіх рангів у єдину систему, яка покликана забезпечувати метрологічну єдність виконання вимірювань з необхідною та заданою точністю.

### **3. Систематизація фізичних величин**

Основною ознакою систематизації є належність величин до однієї з трьох основних сторін явища – речової, енергетичної та інформаційної. Вимірювання величин речової групи необхідне для вивчення фізичних і фізико-хімічних властивостей матеріалів, речовин і їх складу для керування технологічними процесами виробництва.

Вимірювання величин енергетичної групи необхідне для вивчення та керування процесами перетворення, передавання і використання енергії. Величини інформаційної групи відображають динамічні та статичні характеристики процесів. Вимірювання даних величин необхідне для якісного і ефективного керування.

За родом величини всі фізичні величини поділяють на електричні, неелектричні та магнітні. Число електричних та магнітних фізичних величин, що підлягають вимірюванню, не перевищує 100. Число неелектричних величин, які вимірюються і які необхідно вимірювати, з кожним роком зростає і перевищує 4000. Це свідчить про пріоритетний розвиток приладобудування, засобів технологічного контролю, засобів вимірювань і контролю навколишнього середовища, а також засобів контролю речовин, матеріалів і виробів.

За числом значень, за яких може бути вимірювана величина на скінченному проміжку часу, фізичні величини поділяються на неперервні (аналогові) й дискретні.

Аналогова фізична величина – це величина, яка на кінцевому часовому інтервалі в заданому діапазоні набуває нескінченної кількості значень.

Квантова фізична величина – це величина, що поділена на рівні за розміром частини – кванти. За наявністю розмірності розрізняють розмірні та безрозмірні фізичні величини.

Розмірна фізична величина – це величина, в розмірності якої розмірність хоча б однієї з основних величин піднесена до степеня, що не дорівнює нулю.

Безрозмірна фізична величина, в розмірності якої всі степені розмірностей основних величин дорівнюють нулю.

## ЛЕКЦІЯ 4

### ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

1. Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину
2. Загальна класифікація вимірювань
3. Принцип і методи вимірювань
4. Значущість вимірювань



## **1. Вимірювання як процес отримання кількісної інформації про вимірювальну величину**

Вимірювання фізичних величин є одним з найважливіших експериментальних методів пізнання, що ґрунтується на принципі відображення, в якому чітко розрізняється предмет відображення – це фізична величина певного розміру, і результат відображення – це значення фізичної величини.

**Вимірювання** - це знаходження значення фізичної величини чи її параметра експериментально за допомогою спеціальних технічних засобів, що забезпечують порівняння величини з одиницею, а також, якщо необхідно, за допомогою виконання певних обчислювальних процедур.

Суть вимірювання - це порівняння вимірюваної величини з деяким її значенням прийнятим за одиницю. Будь-яке вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, що мають нормовані метрологічні властивості

Об'єктами вимірювань можуть бути фізичні тіла та їх системи, речовини та їх стани, а також пов'язані з ними фізичні явища. Так, об'єктом вимірювання може бути електричний трансформатор, що має декілька обмоток на осерді (система фізичних тіл), а також електромагнітне поле, яке створюється струмами, що протікають по обмоткам, (пов'язане з системою тіл явище). Осердя трансформатора характеризується геометричними розмірами, масою, магнітною проникністю, механічними і тепловими властивостями. Кожна з обмоток трансформатора має електричний опір, реактивний опір на певній частоті, опір ізоляції, об'єм, масу.

Отже, кожен з об'єктів вимірювання має різноманітні властивості чи якості, які мають певний кількісний вміст і є фізичною величиною, яку можна вимірювати.

Основними операціями будь-якого вимірювання є відтворення розміру одиниці та порівняння з ним розміру вимірювальної величини. Розмір вимірювальної величини може істотно відрізнятися від розміру одиниці, тоді для можливості їх порівняння застосовують масштабне перетворювання вимірюваної величини чи одиниці. Можуть виникати технічні проблеми точного відтворення розміру одиниці певної фізичної величини, тоді перед операцією порівняння виконують перетворення фізичної величини в іншу величину, для якої відтворення одиниці є простішим. Часто на практиці для отримання результату вимірювання необхідно здійснити обчислення. Отже, перелічені операції згідно ДСТУ 2681-94 можуть бути виконані окремими пристроями, а саме, вимірювальними пристроями, до яких належать міри, вимірювальні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти.

Пристрої, які реалізовані у формі комплексних пристроїв, мають назву вимірювальні засоби, до яких належать вимірювальні прилади, вимірювальні системи, вимірювальні канали, вимірювальні системи та вимірювальні установки. У засобах вимірювань реалізовані всі необхідні вимірювальні

операції, тобто за їх допомогою безпосередньо отримують результат вимірювання.

Вимірювальні пристрої та засоби вимірювань об'єднують у так звані засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), які обов'язково мають нормовані метрологічні властивості, а саме, діапазон вимірювань, клас точності, швидкодія, чутливість та умови застосування. Ці властивості (характеристики) вказують у нормативно-технічній документації на засіб.

ЗВТ використовують в певних умовах, серед них напруга та частота живлення, температура довкілля, тиск та вологість, напруженість магнітного та електростатичного поля, інтенсивність електромагнітного поля, рівень радіації та механічних вібрацій, стрясань та ударів. Під час вимірювання необхідно контролювати і враховувати усі величини, так як вони не є вимірюваними, однак такі, що впливають на роботу

ЗВТ, змінюючи їх характеристики та результати вимірювань. Існує суб'єкт вимірювання – це експериментатор, який може брати безпосередню участь у виконанні вимірювального експерименту. В інших випадках, наприклад, в системах автоматичного керування технологічними процедурами, вимірювальний процес здійснюється автоматично і експериментатор виконує функцію нагляду. Від експериментатора залежить якість виконаного вимірювального експерименту і його результатів. Якщо не вірно записані числові значення результатів чи одиниць, експериментатор може бути причиною появи промахів, тобто завідомо неправильних відхилень результатів від істинних значень величин. Часто від вміння і досвіду експериментатора залежить успіх та якість виконання вимірювань.

Умови вимірювання – сукупність величин, що описують стан довкілля і ЗВТ.

Кожні ЗВТ призначено для роботи в певних умовах, що вказуються в нормативно-технічній документації. Величини, що впливають, при вимірах ЗВТ нормовані: температура, тиск, напруга тощо, якщо їх значення вийшли за межі норми, то їх вплив перекоксує результати вимірювання, і впливають на похибку вимірювання.

Впливальна величина – це ФВ, не вимірювана даним ЗВТ, але що чинить вплив на його результати. Вплив умов вимірювання на ЗВТ проявляється в зміні його метрологічних характеристик. При цьому та частина похибки вимірювання, яка виникає із-за зміни умов, називається додатковою похибкою.

Відповідно до встановлених для конкретних ситуацій діапазонів значень впливальних величин розрізняють:– нормальні умови вимірювання – це умови, при яких зміною результату вимірювання під впливом впливальної величини можна нехтувати відповідно до встановлених норм точності. Нормальні умови вимірювання задаються в нормативній документації на ЗВТ цього виду у формі номіналів з нормованими відхиленнями. За нормальних умов визначається основна похибка даного ЗВТ. Наприклад, амперметр призначений для вимірювання змінного струму з номінальною частотою  $(50 \pm 5)$  Гц. Відхилення частоти за ці межі приведе до додаткової похибки вимірювання

– робочі умови вимірювання – умови, при яких впливальні величини викликають зміни показань ЗВТ.

– граничні умови вимірювання – характеризуються екстремальними значеннями вимірюваної і впливальних величин, які

ЗВТ може витримати без руйнувань і погіршень його метрологічних характеристик.

За умов, відмінних від нормальних, визначається додаткова похибка даного ЗВТ. Для оцінювання додаткової похибки в нормативній документації на ЗВТ вказані норми зміни показань при виході умов вимірювання за межі нормальних.

## **2. Загальна класифікація вимірювань**

Фізичні величини та залежності між ними є найбільш поширеними характеристиками матеріальних об'єктів та процесів. Як було зазначено вище, вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, а також здійснюються певні обчислювальні процедури над отриманими результатами.

Вимірювання можна характеризувати з різних сторін, враховуючи їх різні класифікаційні ознаки, до яких належать:

- відсутність чи наявність в процедурі вимірювання перетворення роду вимірюваної величини та обчислення її значення за відомими фізичними залежностями;

- вид рівняння вимірювання;

- призначення вимірювання для незмінних чи змінних в часі вимірюваних величин;

- особливості визначення похибок вимірювань;

- наявність чи відсутність розмірності у вимірюваної величини;

- співвідношення між кількістю вимірюваних фізичних величин та кількістю вимірювань.

За фізичним принципом, покладеним в основу вимірювань, а також залежно від галузі науки і технології розрізняють електричні, магнітні, механічні, акустичні, оптичні, квантові, хімічні вимірювання.

За способом порівняння з мірою розрізняють такі вимірювання (методи): безпосереднього оцінювання, порівняння з мірою та комбіновані.

За способом отримання результату розрізняють прямі та непрямі вимірювання, які поділяються на опосередковані, сумісні, сукупні вимірювання.

За кількістю опрацьованих первинних результатів розрізняють разові та багаторазові вимірювання.

За характером взаємодії ЗВТ з об'єктом дослідження розрізняють контактні та безконтактні.

За характером зміни величини та показів вимірювальних засобів розрізняють статичні та динамічні вимірювання.

За докладністю оцінювання точності результатів вимірювання розрізняють технічні, лабораторні, науково-дослідні та метрологічні вимірювання.

За відсутністю чи наявності в процедурі вимірювання перетворення роду вимірюваної величини та обчислення її значення за відомими фізичними залежностями вимірювання класифікують на прямі та непрямі. Сутність прямого вимірювання полягає у вимірюванні однієї величини, значення якої знаходить експериментатор безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей.

Вид вимірювання	Ознаки вимірювань
Разові вимірювання	це вимірювання, які виконують у разі стабільних показів засобів вимірювань при наведених похибках. Необхідно здійснити 3...5 спостережень з метою переконання у стабільності показань.
Багаторазові вимірювання	це вимірювання, які здійснюють, коли показання засобів вимірювань є нестабільними, а розходження між ними перевищують допустимі границі, що встановлені згідно класу точності та метрологічних характеристик. Під час проведення таких вимірювань їх кількість становить від 3...5 до мільйонів. За середніми значеннями результатів забезпечується підвищення точності вимірювань завдяки взаємній компенсації складових змінних похибок.
Контактні вимірювання	це вимірювання, при яких засіб вимірювань має безпосередній механічний контакт з досліджуваним об'єктом.
Безконтактна (дистанційні) вимірювання	це вимірювання, під час яких не відбувається безпосереднього механічного контакту ЗВТ з досліджуваним об'єктом, а вимірювальна інформація про стан об'єкта одержується за допомогою використання різних випромінювань: оптичних, акустичних, теплових, іонізаційних, електромагнітних.

Статичні вимірювання	це вимірювання величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, або характеристики зміни величини відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання діаметра, довжини, маси стрижня.
Динамічні вимірювання	це вимірювання величини, яка змінюється протягом вимірювального експерименту або характеристики зміни цієї величини не відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання температури нагрівального елемента або вимірювання сталої температури відразу після розміщення терморезистивного перетворювача у досліджуване середовище, при цьому опір перетворювача ще не досяг усталеного значення.
Технічні вимірювання	це типові вимірювання на об'єктах із застосуванням наперед заданих ЗВТ, вимірювальних схем відповідно до конкретної методики вимірювань. Як правило, у таких вимірюваннях спеціально не оцінюються характеристики точності результатів, оскільки вони закладені ще на етапі планування таких вимірювань у відповідній метрологічній установі, з урахуванням використовуваних ЗВТ та умов вимірювань.
Лабораторні (науково-дослідні) вимірювання	Вимірювання для дослідження фізичних закономірностей в різних об'єктах довкілля, зокрема, створюючи нові технології і засоби вимірювальної техніки. Переважно це не типові вимірювання, за яких необхідно спеціально планувати вимірювальний експеримент, розробляти вимірювальну схему, обґрунтовувати вибір ЗВТ (зокрема, їх характеристики точності),

	забезпечувати умови вимірювань з обов'язковим оцінюванням їх точності.
Метрологічні (еталонні) вимірювання	це вимірювання у метрологічних установках під час досліджень ЗВТ, створення нових методик вимірювань, під час метрологічних випробувань, контролю, атестації та експертизи при передаваннях розмірів одиниць фізичних величин. Такі вимірювання здійснюються відповідно до суворо регламентованих рекомендацій, сформульованих у відповідних нормативних документах, що часто мають статус державних стандартів.

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї величини, в якому її значення одержують безпосередньо за показом відповідного приладу  $X_n$ , без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень.

Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму амперметром, вимірювання температури термометром, вимірювання інтервалу часу годинником, вимірювання електричного опору омметром.

Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямим вимірюванням, коли шкала приладу проградуєвана у відповідних значеннях вимірюваної величини. Вимірювання вважається також прямим і тоді, коли результат знаходять, опрацьовуючи результати спостережень без перетворення роду величини. Наприклад, якщо для розширення границь вимірювання амперметра застосовують вимірювальний трансформатор струму, вольтметра – вимірювальний трансформатор напруги чи подільник напруги.

Сутність непрямого вимірювання полягає у знаходженні однієї чи декількох вимірюваних величин після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо.

Непрямі вимірювання можуть бути опосередкованими, сукупними та сумісними.

**Опосередковане вимірювання** – це непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворювання, або шляхом числового вимірювального перетворення.

Наприклад, при опосередкованих вимірюваннях потужності постійного струму її визначають чи на основі прямих вимірювань струму та напруги за

формулою , чи на основі фізичного вимірювального перетворення добутку в іншу фізичну величину.

**Сукупне вимірювання** – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних фізичних величин отримують розв’язанням рівнянь, що пов’язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано. Метою сукупних вимірювань є знаходження шляхом числових вимірювальних перетворень значень декількох фізичних величин за неможливості їх окремого прямого вимірювання. При цьому завдяки усередненню досягається ще й зменшення випадкової похибки вимірювання.

**Сумісне вимірювання** – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв’язанням рівнянь, які пов’язують їх з іншими фізичними величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

### 3. Принцип і методи вимірювань

Метод вимірювання – це прийом або сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання, вибраних для вирішення конкретного вимірювального завдання.

Вибір методу залежить від виду вимірюваної величини, її розміру, точності результату вимірювання, швидкості його отримання, умов при яких робляться виміри, і ряду інших ознак.

Розрізняють методи:

1. Метод безпосередньої оцінки. Значення вимірюваної ФВ визначають безпосередньо по відліковому пристрою ЗВТ прямої дії. Це найбільш поширений метод, його реалізують більшість ЗВТ.

У методі безпосередньої оцінки міра в явному виді при вимірах не присутня, її розміри перенесені на відліковий пристрій (шкалу) ЗВТ заздалегідь при його градуванні. Наприклад, вимір розміру за допомогою штангенциркуля або мікрометра, сили електричного струму амперметром тощо.

2. Метод порівняння з мірою. Вимірювану величину порівнюють з величиною, відтвореною мірою. Особливість – безпосередня участь міри в процедурі вимірювання. Наприклад, вимір маси на важільних вагах з урівноваженням гирями. Міра маси – гиря (кг).

Метод порівняння з мірою має декілька різновидів:

– нульовий метод (чи метод повного урівноваження) – результат порівняння вимірюваної величини і міри доводиться до нуля. Наприклад, вимір маси на рівноплечих вагах. Висока точність індикатора дозволить отримати малу похибку, нульовий метод застосовують в лабораторіях, аптеках, медицині;

– диференціальний метод – повне урівноваження не виробляють вимірюваної величини і міри.

– метод заміщення – метод порівняння з мірою, в якому вимірювану величину заміщають відомою величиною, відтвореною мірою. Наприклад,

зважування на пружинних вагах. Вимір робиться в два прийоми. Спочатку на чашу ваг поміщають масу, що завантажується, і відмічають положення покажчика ваг.

– метод збігів – різницю між вимірюваною величиною і величиною відтвореною мірою вимірюють, використовуючи збіги відміток шкал або періодичних сигналів. Наприклад, вимір довжини за допомогою штангенциркуля з ноніусом. Метод збігів, що використовує збіг основної і ноніусної відміток шкал.

Методика виконання вимірювання (МВВ) – це сукупність процедур і правил, виконання яких забезпечує отримання результатів вимірювання з необхідною точністю. МВВ включає вимоги до вибирання засобів вимірювання, послідовності виконання усіх операцій, дотримання встановлених умов вимірювання, числа вимірювання, способів обробки їх результатів. Законодавчою і нормативною базою розробки МВВ є Закон України «Про метрологію і метрологічну діяльність» і міждержавний стандарт ГОСТ 8.010-99.

**Принцип вимірювання** – це фізичний закон (ефект, явище), на якому ґрунтується вимірювання, це наукова основа вимірювання.

Залежно від принципу вимірювань вимірювання класифікують як електричні та магнітні, акустичні та оптичні, механічні та хімічні, теплові та квантові.

У процесі вимірювання виконуються завдання різного характеру і складності. Проте підхід до їхнього вирішення має багато спільного і може бути зведений до певного **алгоритму виконання вимірювань**, який складається:

- з постановки вимірювального завдання. При розв'язанні такої проблеми визначається рід вимірюваної величини та діапазон, в якому вона може змінюватись.

Правильність формулювання поставленого завдання визначає в кінцевому підсумку якість вимірювань і економічні витрати на їх виконання;

- з вибору методу вимірювання. При виборі методу враховуються методичні похибки існуючих методів вимірювання. За результатами вибору методу вимірювання методична похибка повинна бути меншою за деяку припустиму похибку, це дозволить перейти до розв'язання наступної проблеми;

- з синтезу вимірювальної системи (кола). Один і той самий метод вимірювання може бути реалізований різними способами. Тому важливо правильно вибрати вимірювальну схему і конкретно реалізувати її, з урахуванням необхідних метрологічних характеристик засобів вимірювання;

- з вимірювального експерименту;

- з обробки результатів вимірювання, яка містить:

- перший етап - зчитування (зняття) інформації, перетворення її в цифровий код і запис в запам'ятовувальній пристрій мікропроцесора цифрового приладу;

- другий етап - статистична обробка результатів спостереження з оцінкою ступеня довіри;



- третій етап - інтерпретація результатів, одержаних на другому етапі обробки.

#### **4. Значущість вимірювань**

У філософському аспекті значущість вимірювань визначається тим, що вимірювання є універсальним і разом із лічбою найбільш точним методом пізнання фізичних явищ і процесів. Тому метрологія, як наука про вимірювання, займає особливе місце серед інших наук, що обслуговує кожну з них та тісно переплітається з ними.

У науці значущість вимірювань визначається тим, що за допомогою вимірювань у фізичних науках здійснюється зв'язок науки і практики. Тому то фізики часто відносять метрологію до експериментальної фізики. Відомо, що в основі як математики, так і метрології лежить аксіома Евдокса-Архімеда про несумірні відрізки і натуральний ряд чисел, при цьому, якщо враховувати відоме визначення математики, як науки про числа і простір, то можна стверджувати, що метрологія, яка методологічно об'єднує неперервні фізичні величини і просторові з числами, то метрологія є фізико-математичною наукою.

Значущість вимірювання в *технічному* аспекті визначається тим, що вимірювання забезпечують створення кількісної вимірювальної інформації про об'єкт, без якої неможливе точне відтворення всіх заданих умов технологічного процесу, які необхідні для одержання високої якості виборів.

## **ЛЕКЦІЯ 5 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ**

1. Похибки вимірювання. Класифікація похибок
2. Правила округлення результатів вимірювання і значень похибки
3. Знаходження систематичної похибки за класом точності засобу вимірювання
4. Випадкова похибка

### **1. Похибки вимірювання. Класифікація похибок**

Будь-який процес вимірювання незалежно від умов, в яких його проводять, пов'язаний з похибками, які перевертають уявлення про дійсне значення вимірюваної величини. Якість вимірювання тим вище, чим ближче результат вимірювання до дійсного значення.

Кількісною характеристикою якості вимірювання є похибка вимірювання, яка залежить від професіоналізму оператора, від устаткування, похибки ЗВТ, методів вимірювання, дії зовнішніх чинників тощо.

Введення поняття «похибка» вимагає визначення і чіткого розмежування трьох понять: істинного, дійсного і виміряного значення.

Істинне значення ФВ ідеальним чином в якісному і кількісному сенсах відображає певну властивість об'єкту. Воно не залежить від засобів нашого пізнання і є тією абсолютною істиною, до якої ми прагнемо, намагаючись

виразити її у вигляді числових значень. На практиці це абстрактне поняття доводиться замінювати поняттям «Дійсне значення».

Дійсне значення ФВ – знайдено експериментальним шляхом і настільки наближається до істинного значення, що для цієї мети може бути використано замість нього.

Вимірне значення ФВ (результат вимірювання) – є наближеною оцінкою істинного значення величини, отримано при вимірі із застосуванням конкретних методів і засобів вимірювання.

Поняття «похибка» – одне з центральних в метрології, де використовуються поняття «Похибка результату вимірювання» і «похибка засобу вимірювання». Похибка має бути обов'язково оцінена.

Похибка результату вимірювання – це різниця між результатом вимірювання  $x$  і істинним (дійсним) значенням  $Q$  вимірюваної величини.

Похибки, що виникають в процесі вимірювання, можна розділити:

1. За способом вираження:

– абсолютна похибка – це алгебраїчна різниця між отриманим при вимірі і дійсним значенням вимірюваної ФВ, виражена в одиницях вимірювання цієї величини:  $\Delta = x - Q$ , де  $x$  – результат вимірювання;  $Q$  – дійсне значення вимірюваної величини;

– відносна похибка – похибка, що визначається відношенням абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини і виражається в долях або у відсотках від значення вимірюваної ФВ:

$$Q \Delta \delta = \pm \text{чи} \times 100\% \Delta \delta = \pm Q .$$

2. За характером прояви:

– систематична похибка – складова похибки результату вимірювання, яка при повторних вимірах однієї і тієї ж величини в одних і тих же умовах залишається постійною або закономірно змінюється. Наприклад, лінійка має неточність ціни ділення, отже, ця похибка перенесеться на усі результати вимірювання, оператор систематично робить одну і ту ж помилку.

Як правило, систематичні похибки можуть бути визначені до початку вимірювання. Оскільки істинне значення визначити неможливо, не можна визначити і систематичну похибку вимірювання. Саме тому цю похибку не визначають, а оцінюють розрахунковими методами або шляхом проведення вимірювального експерименту із застосуванням точніших ЗВТ, замінюючи істинне значення дійсним.

Якщо значення систематичної похибки, оцінене в процесі цього експерименту, виявляється істотним в порівнянні з необхідною похибкою вимірювання, то в результат вимірювання вводиться поправка або поправочний множник для компенсації цієї похибки. Оскільки систематична похибка і усі її причини не можуть бути відомі точно, компенсація не може бути повною, залишається невиключний залишок систематичної похибки (НЗСП);

– випадкова похибка – складова похибки результату вимірювання, змінюється випадковим чином (за знаком і значенням) при повторних вимірах однієї і тієї ж величини в одних і тих же умовах, наприклад, неправильне функціонування вимірювального пристрою, зміна зовнішніх умов вимірювання випадкового характеру. У появі таких похибок не спостерігається якої-небудь закономірності, вони проявляються у вигляді розкиду отриманих даних.

Випадкові похибки завжди присутні в результатах вимірювання, причому, чим більше вимірювання, тим менше випадкова похибка. Випадкові похибки не передбачені, не усунені, їх вплив може бути зменшений шляхом обробки результатів вимірювання методами теорії імовірності і математичної статистики;

– груба похибка (промах) – випадкова похибка результату окремого спостереження, що входить в ряд вимірювання, яка для цих умов різко відрізняється від інших результатів вимірювання. Наприклад, помилка оператора, різка зміна умов вимірювання, збій ЗВТ. Промахи виявляються обробкою результатів вимірювання за допомогою спеціальних критеріїв – Романовського, Шарл'є, Шовіне.

3. За джерелами виникнення:

– інструментальна похибка – складова похибки вимірювання, що належить цьому засобу вимірювання, наприклад, знос, несправність, неправильна установка, налаштування;

– методична похибка (теоретична) – складова похибки вимірювання, що виникає із-за недосконалості методу вимірювання. Ці дві похибки можуть мати і систематичну, і випадкову складові:

– кліматичні чинники – складова похибки вимірювання, залежна від умов вимірювання.

– суб'єктивні похибки – обумовлені станом оператора, що проводить виміри, його положенням під час роботи, недосконалістю органів чуття, його кваліфікацією і реакцією.

## **2. Правила округлення результатів вимірювання і значень похибки**

Оскільки похибки вимірювання визначають лише зону невизначеності результатів, їх не вимагається знати дуже точно. У остаточному записі похибку вимірювання прийнято виражати числом з одним або двома значущими цифрами. Основні нормативні документи за правилами округлення і запису результатів вимірювання: ГОСТ8.207-76, МИ 1730-87.

1. Похибка результату вимірювання вказується двома значущими цифрами, якщо перша з них рівна 1 або 2, наприклад,  $0,1245=0,12$ ;  $0,001245=0,0012$ ;  $1245=12$ . Однією – якщо перша цифра дорівнює 3 і більш, наприклад,  $0,344=0,3$ ;  $0,0057=0,006$ ;  $0,00550=0,006$ ;  $0,00554=0,006$ . При  $n>10$  надійно залишати в усіх випадках дві значущі цифри.

2. Округлювати числове значення результату вимірювання слід відповідно до числового розряду значущої цифри похибки. Наприклад: при вимірі набуто значення сили електричного струму  $2,65$  А, похибка  $\pm 0,06145$  А. результат округлення має бути записаний у вигляді  $I=(2,65\pm 0,06)$  А. якщо похибка складає  $\pm 0,006145$  А, то результат  $I=(2,650\pm 0,006)$  А. Наочно вказувати межі інтервалу невизначеності вимірюваної величини  $2,59A < I$

3. Якщо цифра старшого з відкинутих розрядів менше 5, то інші цифри числа не змінюються. Зайві цифри в цілих числах замінюються нулями, а в десяткових дробах відкидаються.

4. Якщо цифра старшого з відкинутих розрядів більше або рівна 5, але за нею йдуть відмінні від нуля цифри, то останню цифру, що залишається, збільшують на одиницю.

5. Якщо відкидана цифра дорівнює 5, а цифри, що йдуть за нею, невідомі або нулі, то останню цифру числа, не змінюють, якщо вона парна, і збільшують на одиницю, якщо вона непарна.

6. Округлення робиться лише в остаточній відповіді, а усі попередні обчислення проводять з одним-двома зайвими знаками. Якщо керуватися цими правилами округлення, то кількість значущих цифр в числовому значенні результату вимірювання дає можливість, орієнтовно судити про точність вимірювання. Це пов'язано з тим, що гранична похибка, обумовлена округленням, дорівнює половині одиниці останнього розряду числового значення результату вимірювання.

### **3. Знаходження систематичної похибки за класом точності засобу вимірювання**

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

Систематична похибка вважається специфічною випадковою величиною, що має деякі, але не усі властивості випадкової величини, що вивчається в теорії імовірності і математичній статистиці. У метрологічній практиці при оцінці систематичних похибок повинен враховуватися вплив наступних чинників:

1. Об'єкт вимірювання. Перед виміром він має бути добре вивчений з метою коректного вибору його моделі. Наприклад, при вимірі площі сільськогосподарських угідь кривизна земної поверхні може не враховуватися, оскільки вона не вносить відчутної похибки, проте при вимірі океанів нею нехтувати вже не можна.

2. Суб'єкт вимірювання. Щоб зменшити похибку вимірювання необхідно підібрати оператора високої кваліфікації.

3. Метод і засіб вимірювання. Надзвичайно важливий їх правильний вибір.

4. Умови вимірювання. Забезпечення і стабілізація нормальних умов необхідна вимога. Відомий ряд способів виключення систематичних похибок, які умовно можна розділити на чотири основні групи, – усунення джерел похибок до початку вимірювання; – виключення похибок в процесі вимірювання способами заміщення, компенсації похибок по знаку, протиставлення (перестановки), симетричних спостережень; – внесення відомих поправок до результату вимірювання (виключення похибок обчисленням); – оцінка меж систематичних похибок, якщо їх не можна виключити.

За характером прояви систематичні похибки поділяються:

1. За характером зміни в часі: – постійні систематичні похибки – залишаються незмінними протягом усієї серії вимірювання. Наприклад, похибка від того, що неправильно встановлений нуль на шкалі приладу, похибка від постійної додаткової ваги на чашці ваг тощо. – змінні (прогресивні) систематичні похибки – змінюються в процесі вимірювання, при цьому зростаючи або убуваючи. Періодичною називається похибка, значення якої є періодичною функцією часу. Наприклад, похибки, що виникають внаслідок

зносую контактуючих деталей засобів вимірювання, при поступовому розряді батареї, що живить засіб вимірювання, коливання температури довкілля.

2. З причин виникнення: – методичні; – інструментальні; – особисті (суб'єктивні).

#### **4. Випадкова похибка**

Випадкові похибки є похибками, в появі кожної з яких не спостерігається якої-небудь закономірності. Випадкові похибки неминучі і неусувні і завжди присутні в результаті вимірювання. Вони викликають розсіювання результатів при багатократному і досить точному вимірі однієї і тієї ж величини за незмінних умов, за допомогою одного і того ж вимірювального пристрою одним і тим же оператором, викликаючи відмінність в останніх значущих цифрах.

Отже, під випадковою величиною розуміють числовий результат експерименту з випадковим результатом  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Кожна випадкова похибка виникає в результаті дії багатьох чинників, кожен з яких сам по собі не чинить значного впливу на результат, але сумарна їх дія може викликати помітні похибки.

Оскільки випадкові похибки не піддаються виключенню з результатів вимірювання, то при розгляді їх впливу на результат вимірювання завдання зводиться до вивчення властивостей сукупностей результатів окремих спостережень. Передбачити результат окремого спостереження і виправити його введенням поправки неможливо. Можна лише з певною долею упевненості стверджувати, що істинне значення вимірюваної величини знаходиться в межах розкиду результатів спостережень від  $x_{\min}$  та  $x_{\max}$ ,  $x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}$ , де  $x_{\min}$  – нижня межа розкиду;  $x_{\max}$  – верхня межа розкиду. Для вивчення властивостей випадкових похибок у великих сукупностях використовуються методи теорії імовірності і математичної статистики. Ці методи застосовні і для невиключених систематичних складових.

Випадковою називають таку величину, яка в результаті досліду може прийняти те або інше значення, невідомо заздалегідь – яке саме. Безліч значень випадкової величини може бути кінцевою або рахунковою – дискретна випадкова величина.

## **ЛЕКЦІЯ 6**

### **ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

1. Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки
2. Вимірювальні прилади
3. Структурні схеми вимірювальних приладів та систем
4. Аналогові та цифрові вимірювальні прилади

#### **1. Засоби вимірювань, їх види та класифікаційні ознаки**

**Засіб вимірювальної техніки (ЗВТ)** – це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики. ЗВТ взаємодіє з об'єктами, внаслідок чого на його вході отримують сигнали, які містять інформацію про вимірювану величину. Згідно з ДСТУ 2681-94 до ЗВТ належать засоби вимірювань (ЗВ) та вимірювальні пристрої (ВІПР).

Засобами вимірювань є засоби, що реалізують процедуру вимірювань, а саме, вимірювальні та реєструвальні прилади, аналогові вимірювальні прилади, цифрові вимірювальні прилади, вимірювальні установки, вимірювальні канали та вимірювальні інформаційні системи. Особливістю засобів вимірювань є те, що з їх допомогою безпосередньо одержують результат вимірювань.

Вимірювальні пристрої – це засоби вимірювальної техніки, в яких виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань – вимірювальна операція. Виділяють такі вимірювальні пристрої: міра, вимірювальний перетворювач, масштабний перетворювач, компаратор та числовий вимірювальний перетворювач (обчислювальний компонент).

Особливістю ВПР є те, що вони самостійно не забезпечують одержання результату вимірювання, а лише в сукупності з іншими пристроями та засобами вимірювань.

Під засобом вимірювання розуміється технічний засіб, що призначений для вимірювання, має нормовані метрологічні характеристики, відтворюючі і (чи) зберігаючи одиницю фізичної величини, розмір якої приймається незмінним (в межах встановленої похибки) протягом відомого інтервалу часу. Засоби вимірювання можна класифікувати за наступними ознаками: тип, вид і метрологічне призначення.

Тип – це сукупність засобів вимірювання, що мають принципово однакову схему, конструкцію і виготовляються за одними і тими ж технічними умовами.

Вид – це сукупність засобів вимірювання, призначених для вимірювання якої-небудь однієї фізичної величини. По метрологічному призначенню засобу вимірювання підрозділяються на робочі засоби вимірювання, призначені для вимірювання фізичних величин; метрологічні засоби вимірювання, призначені для забезпечення єдності вимірювання.

До засобів вимірювальної техніки відносяться:

1. Міра – засіб вимірювання, призначений для відтворення заданого розміру фізичної величини. На практиці використовують однозначні, багатозначні міри, а також набори і магазини мір. Однозначні міри відтворюють фізичну величину тільки одного розміру. Наприклад, міра маси – гиря, міра індуктивності – зразкова котушка індуктивностей.

Багатозначні міри відтворюють декілька розмірів однойменної фізичної величини. Наприклад, міліметрова лінійка дає можливість виразити довжину предмета в сантиметрах і міліметрах. Набори і магазини – комплекти і поєднання мір різного розміру однієї і тієї ж ФВ. Наприклад, набір лабораторних гир, магазин резисторів.

2. Вимірювальний перетворювач перетворює сигнал в зручну форму для обробки, зберігання, а також передачі в пристрій, що відображує. Вимірювальні перетворювачі або входять в схему вимірювального приладу, або застосовуються спільно з ним, але сигнал перетворювача недоступний для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Основною метрологічною характеристикою вимірювального перетворювача вважається співвідношення між вхідною і вихідною величиною, яке називається функцією перетворення. Наприклад, перетворювач напруги – для вирівнювання, посилення напруги. Вимірювальні підсилювачі, трансформатори, перетворювачі тиску.

3. Вимірювальний прилад – засіб вимірювання, призначений для набуття значень ФВ, перетворюючи сигнал у форму доступну для сприйняття. Наприклад, як пристрій для індексації використовуються шкала і стрілка. Вимірювальні прилади діляться: – прямої дії – відображують вимірювану величину в одиницях цієї величини. Наприклад, амперметри (сила струму), вольтметри (напруга), манометри (тиск), термометри; – прилади порівняння – порівнюють вимірювану величину із заздалегідь відомою. Такі прилади використовуються в наукових цілях для вимірювання яскравості джерел випромінювання, тиску стислого повітря, потенціометри електровимірювань тощо; – реєструючи – засоби вимірювання, які реєструють показання

вимірювання на якому-небудь носіїві. Реєстрація проводиться в цифровій або аналоговій формі (на папері або стрічці), розрізняють самописні і друкуючі вимірювальні прилади. Залежно від форми представлення інформації розрізняють: – аналогові прилади – показання є безперервною функцією зміни вимірюваної величини. Наприклад, стрілочний вольтметр, ртутно-скляний термометр; – цифрові прилади – показання представлені в цифровій формі, наприклад, штангенциркуль з числовим відліком, мікрометр тощо; чи перетворюють аналоговий сигнал вимірювальної інформації в цифровий код, при цьому результат відображається на цифровому табло.

4. Вимірювальні установки і системи – використовуються для контролю виробничих процесів, що особливо важливо для методу статистичного контролю. Вимірювальна установка – сукупність функціонально об'єднаних ЗВТ, для вимірювання ФВ, розташованих в одному місці для контролю об'єкту. Виробляє сигнал у формі зручної для спостерігача. Вимірювальна система – сукупність ЗВТ, розміщених в різних точках контрольованого об'єкту, сполучених між собою каналами зв'язку. Зазвичай такі системи автоматизовані. Виробляє сигнал у формі зручної для автоматичної обробки і відображення результату вимірювання у формі зручної для користувача.

5. Вимірювальне приладдя – це допоміжні засоби для вимірювання величин. Застосовуються для обчислення поправок, якщо вимагається висока точність вимірювання. Наприклад, термометр може бути допоміжним засобом, якщо показання достовірні при певній температурі; психрометр – якщо обмовляється вологість довкілля. Засоби вимірювання ділять на два види – робочі засоби і еталони. Робочі засоби можуть бути: – лабораторними – використовують для наукових досліджень. Показники – найточніші і чутливі; – виробничими – використовують для контролю характеристик технологічних процесів. Показники мають бути стійкими до дії різних чинників виробничого процесу: температури, вологості, вібрації тощо; – польовими – для літаків, автомобілів, судів. Показники знімаються при роботі в умовах зовнішнього середовища, що постійно змінюється.

## **2. Вимірювальні прилади**

Відтворення фізичної величини – це вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення. Відтворення є найважливішою операцією вимірювання, тому що визначається ступінь його досконалості - точність. Засіб відтворення фізичної величини в метрології має назву міра.

Міра – це вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та зберігання фізичної величини заданого розміру.

Міри поділяються на еталони, зразкові та робочі.

Еталони займають значне місце серед мір, так як мають найвищу точність та здійснюють відтворення та зберігання одиниць фізичних величин з метою передачі їх розміру зразковим мірам.

Зразкові міри передають розмір фізичних величин робочим мірам, які призначені для визначення метрологічних характеристик засобів вимірювання.



Крім того, міри поділяються на однозначні, які відтворюють фізичну величину у даний момент часу одного розміру, і багатозначні, які відтворюють багато значень фізичної величини із заданими у деякому діапазоні.

Вимірювальне перетворювання фізичної величини – це вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у вихідну, функціонально з нею пов'язану. Головна задача вимірювальних перетворень – це одержання вихідних фізичних величин та залежностей між ними, які зручні для порівняння та відтворення. До вимірювального перетворювання фізичної величини належать:

- лінійне (масштабне) перетворення фізичної величини без зміни її роду;
- нелінійне перетворення фізичної величини без зміни її роду;
- лінійне перетворення фізичної величини зі зміною її роду;
- нелінійне перетворення фізичної величини без зміни її роду.

Завдяки вимірювальному перетворенню досягається узгодження роду, меж зміни і частотного діапазону сигналів.

Вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення.

Вимірювальні перетворювачі (ВП) класифікують за такими ознаками:

- за структурою побудови – на ВП прямого перетворення (з розімкненою структурою) та ВП зрівноважувального перетворення (з замкненою структурою);

- за зміною роду вихідної величини – на ВП без зміни роду та ВП зі зміною роду вихідної величини, які необхідні у тих випадках, коли для вимірюваної вхідної величини немає міри або компаратора; - за характером залежності – на лінійні та нелінійні;

за кількістю каналів – на одно- та багатоканальні; - за видом вихідного сигналу – на параметричні та генераторні;

- за родом фізичних явищ – на термоелектричні, оптоелектричні, п'єзоелектричні, електромагнітні та магнітоелектричні;

- за принципом дії – на генераторні та параметричні.

Генераторний ВП – це перетворювач, вихідні сигнали яких мають енергетичні властивості – напруга, струму, магніторушійна та електрорушійна сили.

Параметричні ВП - це перетворювач, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх параметрів – опору, індуктивності, ємності та частоти.

Порівняння – це вимірювальна операція, що полягає у відображенні співвідношення між розмірами двох однорідних фізичних величин відповідальним висновком: більша, менша чи однакова за розміром. Порівняння величин широко використовується в різноманітних процедурах: вимірюванні, контролі, роз-пізнаванні образів та керуванні.

Компаратор (пристрій порівняння) – це вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин. Компаратори класифікують за такими ознаками: - за характером дії над сигналами при порівнянні – на компаратори з відніманням сигналів і компаратори з комутацією сигналів; - за кількістю каналів – на одно- і багатоканальні.

Масштабне перетворення – це лінійне вимірювальне перетворювання вхідної величини без зміни роду. В результаті масштабного перетворення

вхідна величина перетворюється в однорідну вихідну, розмір якої пропорційний в  $k$ -раз розміру вхідної.

Масштабний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірювальне перетворення. Прикладом масштабних вимірювальних перетворювачів є шунти для амперметрів, додаткові резистори для вольтметрів, а також вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Числове вимірювальне перетворення – це операція обчислення проміжних результатів вимірювань з метою отримання остаточного результату.

Числовий вимірювальний перетворювач – це вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювань.

### 3. Структурні схеми вимірювальних приладів та систем

В сучасних засобах вимірювань здійснюються різноманітні та багатоетапні перетворення сигналів вимірювальної інформації. Для аналізу складних перетворень сигналів у засобах вимірювань доцільно перетворення сигналів поділити на низку простих елементарних операцій над вимірювальними сигналами. Кожній операції відповідає *ланка* структури, яка графічно ілюструє дану операцію над вхідним  $X$  сигналом для отримання вихідного сигналу  $Y$ .

**Структурна схема вимірювального пристрою** – це схема, що відображає його основні функціональні частини (структурні елементи) та їх призначення та взаємозв'язки.

За структурою вимірювальні пристрої можна поділити на три типи:

- пристрої прямого перетворення;
- пристрої зрівноважувального (компенсаційного) перетворення;
- пристрої комбінованого перетворення.

Пряме перетворення характеризується тим, що вимірювальна інформація передається тільки в одному напрямі – від входу до виходу без зворотного зв'язку між ними. Сигнал послідовно етап за етапом перетворюється і на виході має форму, яка доступна для безпосереднього сприйняття експериментатором. Коефіцієнт перетворення засобу вимірювань за такою структурою за умови, що всі перетворювальні елементи мають лінійні функції перетворення, дорівнює добутку коефіцієнтів перетворення окремих перетворювачів структури за формулою

Відносна похибка дорівнює сумі відносних похибок від окремих перетворювальних елементів.

Зрівноважувальне перетворення – це перетворення, при якому вхідна величина врівноважується іншою однойменною величиною.

Існує два види зрівноважувального перетворення:

- слідкувальне (статичне) зрівноважувальне перетворення, структурна схема вимірювального кола засобу вимірювання.
- астатичне зрівноважування
- розгортальне зрівноважувальне перетворення.

### 4. Аналогові та цифрові вимірювальні прилади

Цифровими вимірювальними приладами (ЦВП) називаються прилади, в яких під час вимірювання здійснюється автоматичне перетворення неперервної вимірюваної величини в дискретну з подальшою індикацією результату вимірювання у цифровій формі.

Основними функціональними вузлами ЦВП є: вхідний аналоговий перетворювач (ВАП), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), обчислювальний пристрій (ОП), цифровий відліковий пристрій (ЦВП) і пристрій управління (ПУ).

Вимірювана величина  $x(t)$  спочатку перетворюється за допомогою ВАП в іншу величину  $x'(t)$ , зручну для подальшого аналого-цифрового перетворення. Наприклад, ВАП перетворює напругу або силу змінного струму в напругу постійного струму, електричний опір в напругу постійного струму, виконує масштабне перетворення вхідного сигналу тощо.

Аналого-цифровий перетворювач перетворює величину  $x'(t)$  у відповідний їй цифровий код  $N$ , який або надходить безпосередньо на цифровий відліковий пристрій ЦВП, або піддається додатковому опрацюванню в обчислювальному пристрої (ОП). Зокрема, ОП може усереднювати результати декількох вимірювань для зменшення випадкової похибки, визначення параметрів сигналів, наприклад, частоти на основі інформації про період та інші сервісні функції.

Цифровий відліковий пристрій містить дешифратор для перетворення вихідного цифрового коду АЦП або ОП в десятковий цифровий код і табло індикації результату вимірювання.

Вихідний цифровий код АЦП може надійти також на цифровий реєструвальний пристрій або на вхід ЕОМ і використовуватись у системах керування об'єктами.

Роботою всіх вузлів ЦВП керує пристрій управління ПУ. Залежно від виду вимірюваних величин ЦВП діляться на:

- 1) вольтметри постійного та змінного струму;
- 2) вимірювачі частоти та інтервалу часу;
- 3) омметри та мости постійного та змінного струму;
- 4) комбіновані прилади (мультиметри);
- 5) вимірювачі потужності;
- 6) фазометри;
- 7) спеціалізовані ЦВП, призначені для вимірювання температури, витрати, швидкостей, механічних напружень тощо.

Аналоговими вимірювальними приладами (АВП) називаються прилади, покази яких є неперервними функціями вимірювальних фізичних величин. АВП являють собою найпоширеніший клас засобів вимірювань. Залежно від призначення вони поділяються на амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, частотоміри, фазометри, прилади для вимірювань неелектричних величин (температури, тиску, витрати тощо), прилади для вимірювань магнітних величин тощо.

Залежно від елементної бази, використаної для їх побудови, АВП поділяються на електромеханічні та електронні. Електромеханічними називаються прилади, принцип дії яких полягає у перетворенні

електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію переміщення рухомої частини вимірювального механізму

Електронні АВП звичайно будують на основі магнітоелектричного вимірювального механізму з використанням електронних вузлів - вимірювальних підсилювачів, перетворювачів змінного струму в постійний, функціональних перетворювачів тощо. Це дає змогу розширити діапазони вимірювань АВП, а також їх функціональні можливості.

За формою відліку АВП діляться на показуючі, які дають змогу здійснювати тільки відлік показів, і реєструвальні, в яких передбачена реєстрація показів, а за способом перетворення вимірювального сигналу - на прилади прямого, зрівноважувального, компенсаційного та змішаного перетворення.

Прилади, призначені для вимірювання декількох величин, називаються комбінованими, а прилади, які працюють як на постійному, так і на змінному струмі - універсальними.

Загалом вимірювальні прилади, призначені для вимірювання декількох електричних величин як на постійному, так і на змінному струмі, називають мультиметрами. Наприклад, універсальний вимірювальний прилад типу Ц7430, призначений для вимірювання сили та напруги постійного та змінного струмів, а також електричного опору на постійному струмі, є мультиметром.

## ЛЕКЦІЯ 7 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗВТ

1. Характеристики засобів вимірювальної техніки
2. Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками

### 1. Характеристики засобів вимірювальної техніки

Вимірювальна техніка має великий арсенал різноманітних засобів. Проблема правильного вибору необхідного засобу вимірювань є важливою та актуальною. Для вирішення такої проблеми є критерії оцінки ефективності застосування засобів вимірювань, якими є технічні характеристики засобів вимірювань.

Технічні характеристики (метрологічні та неметрологічні) відображають властивості та функціонування засобів вимірювальної техніки.

Метрологічними є ті характеристики засобів вимірювальної техніки, які впливають на результат та точність вимірювання.

Нормованими метрологічними характеристиками вимірювальних приладів є: діапазон вимірювань, клас точності, чутливість та поріг чутливості, стала та ціна поділки шкали, умови застосування – для аналогових вимірювальних приладів, та кількість розрядів і значення одиниці найменшого розряду – для цифрових вимірювальних приладів.

Ці характеристики використовуються для оцінювання результатів вимірювань та встановлення параметрів якості виконаних вимірювань. В таблиці наведені розподіл усієї сукупності метрологічних характеристик ЗВТ, який містить шість груп. Слід відзначити, що для конкретного ЗВТ застосовують такі метрологічні характеристики, які необхідні для визначення

результату та оцінювання точності вимірювань. Такі метрологічні характеристики для конкретного ЗВТ регламентуються Державними стандартними та нормативно-технічними документами на певний ЗВТ. Характеристики ЗВТ поділяються на:

- характеристики мір фізичних величин;
- характеристики вимірювальних приладів;
- характеристики вимірювальних перетворювачів.

Основними характеристиками мір фізичних величин є номінальне значення міри, істинне та дійсне значення міри та похибка міри. Розглянемо кожну характеристику міри фізичних величин більш детально:

- номінальне значення міри – це значення величини, яке присвоєне мірі для відтворення цієї величини, так як істинне значення фізичної величини не можливо визначити через неминучість похибки вимірювання;

Складові сукупності	метрологічних характеристик
1. Характеристики, за якими визначають результат вимірювання	- функція перетворення ЗВТ; - номінальне значення однозначної або номінальні значення багатозначної міри; - стала приладу (ціна поділки шкали) вимірювального приладу або багатозначної міри; - вид вихідного коду, кількість розрядів коду, одиниця молодшого розряду коду цифрових засобів вимірювань.
2. Характеристики, за якими оцінюють точність ЗВТ	- характеристики систематичної складової похибки; - характеристики випадкової складової похибки.
3. Характеристики чутливості ЗВТ до величин впливу	- функція або коефіцієнт впливу; - зміни значень метрологічних характеристик ЗВТ, які спричинені змінами величин впливу у встановлених межах.
4. Динамічні характеристики ЗВТ	Характеристики відповідають динамічному режиму роботи ЗВТ, за якого перетворювана величина є функцією часу: - часові динамічні характеристики; - частотні динамічні характеристики.
5. Характеристики взаємодії ЗВТ з об'єктами дослідження та навантаження	
6. Неінформативні параметри вихідного сигналу ЗВТ	

- дійсне значення міри – це значення міри, яке знайдене вимірюванням з точністю, яка дозволяє використовувати його замість істинного значення фізичної величини;

- похибка міри – це різниця між номінальним значенням міри й істинним  $X$  (дійсним  $X_d$ ) значенням величини, яку міра відтворює.

Оскільки, дійсне значення міри ближче до істинного значення, ніж номінальне, то, щоб підвищити точність оцінювання вимірюваної величини під час порівняння з мірою, замість  $X_n$  треба використовувати  $X_d$ , яке вказується у технічній документації на міру.

**Основними характеристиками вимірювальних приладів** є діапазон показів, діапазон вимірювань, поріг чутливості, ціна поділки шкали та стала приладу – для аналогових вимірювальних приладів та значення одиниці найменшого розряду – для цифрових вимірювальних приладів.

Як було зазначено складовою частиною аналогового приладу є шкала.

**Шкала** – це частина пристрою відліку у вигляді впорядкованої сукупності позначок разом з пов'язаною з нею певною послідовністю чисел. Позначкою шкали може бути риска або інший знак на шкалі, що відповідає одному або декільком значенням вимірюваної величини. Якщо довжина поділок (відстань між осями сусідніх позначок) є сталою вздовж всієї шкали, то така шкала є **рівномірною**.

Шкала з поділками різної довжини має назву **нерівномірною (нелінійною)**.

**Діапазон показань** – це інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений найменшим у діапазоні показів та найбільшим її значенням. Частина діапазону показів засобу вимірювань, для якої про нормовані границі допустимих похибок, називається діапазоном вимірювань. Найменше і найбільше значення діапазону вимірювань називають нижньою  $X_n$  і верхньою  $X_v$  границею вимірювань.

**Показ вимірювального приладу ( $x$ )** – це значення вимірюваної величини, яке відтворене шкалою вимірювального приладу і подане сигналом вимірювальної інформації. Найбільше число, яке можна зчитати з пристрою відліку, має назву **максимальний показ**.

Відлік ( $N_v$ ) – це неіменоване абстрактне число, яке зчитане з пристрою відліку або одержане підрахунком послідовних позначок чи сигналів.

Ціна поділки шкали ( $C_{под}$ ) – це різниця значень вимірюваної величини, що відповідає відстані між двома найближчими позначками шкали.

Стала приладу ( $C$ ) – це відношення границі вимірювання приладу ( $X_k$ ) або максимального значення багатозначної міри до максимального показу і є іменованим числом в одиницях величини  $x$ .

Характеристикою засобу вимірювань, яка визначає близькість його показів до істинного значення вимірюваної величини, є точність засобу вимірювань.

Показником точності є клас точності ЗВ. **Клас точності засобу вимірювань** – це узагальнена характеристика засобу, яка визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також регламентованими характеристиками, що впливають на його точність. Слід відзначити, що клас точності ЗВ – це не похибка, а кількісна характеристика, за величиною якої можна оцінити похибку ЗВ.

На практиці можна застосувати вимірювальний прилад високого класу

точності, але в результаті неправильно проведеного експерименту (наприклад, в області неробочого інтервалу вимірювань) отримати велику похибку показу приладу.

Для цифрових приладів клас точності на шкалі позначається записом, наприклад, 0,02/0,01. В технічні документації це позначення класу точності у вигляді  $c/d$ , яке дорівнює 0,02/0,01.

Клас точності, в загальному вигляді, записується через косу риску з двома літерами  $c/d$ : літера  $d$  – клас точності при нульовому значенні  $x = 0$ , літера  $c$  – клас точності при кінцевому значенні. Числове значення класу точності ЗВТ вказується на циферблаті аналогового вимірювального приладу або у паспорті чи технічному описі приладу, як для багатограничних цифрових вимірювальних приладів.

**Основною характеристикою цифрових вимірювальних приладів є значення одиниці найменшого розряду – це розмір одного кванта  $q$  цифрового ЗВ, що відповідає різниці між двома сусідніми станами цифрового вихідного значення.**

Для вимірювальних перетворювачів існують статичні та динамічні характеристики.

Статична характеристика перетворення відповідає статичному режиму роботи вимірювального перетворювача, за якого перетворювана величина не залежить від часу, а тривалість перетворення достатня для загасання перехідних процесів у вимірювальному колі.

Основними статичними характеристиками вимірювальних перетворювачів є характеристика градуювання, номінальна статична функція перетворення, коефіцієнт перетворення.

Нормовані метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів	Означення
Характеристика градуювання	це залежність між значеннями вимірювальної (перетворюваної) величини на виході та вході вимірювального перетворювача, визначена під час градуювання та подана у вигляді експериментальної таблиці, графічної залежності або аналітичної формули.
Номінальна статична функція перетворення	це функціональна залежність між інформативним параметром $Y$ вихідного сигналу та інформативним параметром $X$ вхідного сигналу
Коефіцієнт перетворення	це відношення вихідної величини $Y$ до вхідної величини $X$

Чутливість перетворення	це відношення зміни вихідного сигналу $\Delta Y$ зміни вхідного сигналу $\Delta X$ , що викликає цю зміну вихідного сигналу – це похідна функції перетворення .
-------------------------	---

Для вимірювальних перетворювачів основною статичною характеристикою є поріг чутливості, який характеризує найменше значення вхідної величини, що викликає помітну зміну вихідної величини, та має розмірність вимірюваної величини.

Наприклад, функцією перетворення термоелектричного перетворювача є залежність між електрорушійною силою  $E$  та температурою середовища  $\Theta$ :  $E=F(\Theta)$ .

Чутливість такого термоелектричного перетворювача має розмірність [мВ/°С], а поріг чутливості має розмірність [°С].

Зона нечутливості – це діапазон значень вимірюваної величини, в межах якого її зміна не викликає зміни показу засобу вимірювань.

Абсолютна похибка перетворювача за виходом – це різниця між істинним значенням вихідної величини перетворювача, що відповідає вхідній величині, та значенням вихідної величини, яка одержана за істинним значенням вхідної величини за допомогою номінальної функції перетворення.

Основними динамічними характеристиками вимірювальних перетворювачів є час перетворення та гранична частота перетворення.

Час перетворення перетворювача – це час, за який динамічна похибка стає допустимою похибкою.

Гранична частота перетворення – це така частота сигналу, при якому динамічна похибка стає допустимою похибкою. Крім метрологічних характеристик засобів вимірювань важливо знати їх й неметрологічні характеристики, а саме, надійність, роботоздатність, відмова, безвідмовність, довговічність, економічність та термін служби.

Неметрологічні характеристики ЗВТ	Означення
Надійність	Здатність ЗВТ зберігати свої характеристики у заданих межах за певних умов експлуатації упродовж заданого часу.
Роботоздатність	Стан ЗВТ, при якому він здатний виконувати свої функції згідно з вимогами нормативно-технічної та конструкторсько-технологічної документації.
Відмова	Стан ЗВТ, при якому здійснюється порушення його роботоздатності. Відмова поділяється на раптову відмову та на поступову відмову.
Безвідмовність	Властивість ЗВТ зберігати роботу здатність упродовж певного інтервалу часу у певних умовах експлуатації.



Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність того, що протягом певного часу безперервної роботи не відбудеться жодної відмови.
Економічність	Простота конструкції ЗВТ та виправдана економічна вартість.
Довговічність	Властивість ЗВТ зберігати роботоздатність і задану ефективність в часі.

## 2. Класифікація засобів вимірювань за метрологічними характеристиками

Результати вимірювань повинні мати певну точність та виражатися у узаконених одиницях вимірювань. Точність результатів вимірювань визначається метрологічними характеристиками тих засобів вимірювань, які застосовувались під час вимірювань. В залежності від метрологічних функцій всі засоби вимірювальної техніки поділяються на державні еталони, робочі ЗВТ та зразкові.

**Державний еталон одиниці вимірювання** – це засіб вимірювальної техніки або комплекс засобів, що забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру іншим засобам вимірювань, клас точності яких нижче, за офіційно затвердженим порядком.

**Робочий засіб вимірювальної техніки** – це засіб, який використовується для практичних вимірювань, але не призначений для повірки інших засобів вимірювань.

**Зразковий засіб вимірювання** – засіб, який призначений для повірки інших засобів вимірювань методом порівняння і офіційно затверджений, як зразковий. До зразкових засобів вимірювань належать зразкові речовини і стандартні зразки.

**Зразкова речовина** – це міра у вигляді речовини з відомими властивостями, які відтворюються, якщо дотримуються умови її виготовлення, що вказані у затвердженій специфікації.

**Стандартний зразок** – це міра для відтворення одиниць величин, що характеризують властивості або склад речовини і матеріалів.

В Україні ведеться державний реєстр засобів вимірювання. Робиться це з метою:

- формування раціональної номенклатури засобів вимірювання і державних стандартних зразків, своєчасного освоєння нових типів вимірювальної техніки та зняття з виробництва застарілих засобів вимірювання;

- обліку засобів вимірювання і державних стандартних зразків затверджених типів, створення централізованих державних фондів інформаційних даних про засоби вимірювання та стандартні зразки, допущені до виробництва і випуску в обіг;

- забезпечення зацікавлених підприємств і організацій, в т. ч. національних органів метрологічної служби інших країн, необхідною інформацією щодо фонду державного реєстру.

## **ЛЕКЦІЯ 8**

### **КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

1. Калібрування засобів вимірювальної техніки та устаткування. Перевірка та калібрування вимірювальної техніки: схожість та відмінність
2. Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки
3. Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки

#### **1. Калібрування засобів вимірювальної техніки та устаткування. Перевірка та калібрування вимірювальної техніки: схожість та відмінність**

Технічною базою забезпечення єдності вимірювання є система відтворення одиниць фізичних величин і передачі інформації про їх розміри усім без виключення засобам вимірювальної техніки в країні.

Передача розмірів фізичних одиниць – це технічна операція, яка проводиться за допомогою перевірочних схем, шляхом перевірки або калібрування засобів вимірювання.

Перевірочна схема – це ухвалений в установленому порядку нормативний документ, що регламентує засоби, методи, точність, похибку передачі розмірів одиниць фізичної величини від державного еталону або початкового еталону робочим засобам вимірювання. Перевірочна схема може бути державною або локальною.

Державна перевірочна схема – поширюється на усі ЗВТ даної ФВ, наявні в країні. Розробляються метрологічними установами, що є головними центрами державних еталонів. Вони очолюються державними еталонами.

Локальна перевірна схема – поширюється на ЗВТ даної ФВ, належній перевірці в окремому органі метрологічної служби (відомство, підприємство). Розробляються метрологічною службою підприємства і до затвердження керівництвом підприємства узгоджується з територіальним органом Держспоживстандарту. Вона очолюється початковим еталоном.

Відомча перевірна схема – поширюється на СІ цієї ФВ, що підлягають відомчій перевірці.

Перевірочні схеми оформляються у вигляді креслень, доповнюючи текстовою частиною, яка включає вступну частину і пояснення до елементів креслення. До нормативної документації, що регламентує вимоги до організації технічного забезпечення єдності вимірювання в області метрологічного забезпечення виробництва можна віднести ГОСТ8.061-80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» – правила розрахунку параметрів перевірочних схем, оформлення креслень перевірочних схем; ДСТУ 2708-2006 «Перевірка засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення»; ДСТУ 3989-2000 «Калібрування засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення».

Перевірка – встановлення придатності засобів вимірювальної техніки, на які поширюється Державний нагляд або контроль. В процесі перевірки здійснюється нагляд за одноманітністю ЗВТ, яка характеризується виконанням двох вимог: ЗВТ мають бути проградуєвані в узаконених одиницях, а їх метрологічні характеристики повинні відповідати нормам.

Перевірка здійснюється територіальними метрологічними службами, державні повірники ЗВТ. Можуть також проводити перевірку метрологічні служби підприємств, що отримали право на її проведення. ЗВТ, визнане придатним до застосування, оформлюється видачею свідоцтва про повірку і нанесенням повірочного клейма.

Калібрування – визначення метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, на які не поширюється Державний нагляд. Встановлення метрологічних характеристик ЗВТ в реальних умовах їх застосування. Калібрування підрозділяється на:

- первинне, якому піддаються усі ЗВТ, що виходять з виробництва або ремонту;
- періодичне, якому піддаються усі ЗВТ, що знаходять в експлуатації, через встановлений власником міжповірочний інтервал;
- позачергове, якому піддаються ЗВТ, що викликали підозри до своїх метрологічних характеристик.

Міжповірочний інтервал встановлюється власником ЗВТ, що несе відповідальність за його робочий стан.

## **2. Мета і види метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки**

Засоби вимірювальної техніки є технічними засобами, які характеризуються нормованими метрологічними характеристиками. Надійність ЗВТ визначається їхньою здатністю зберігати метрологічні характеристики в регламентованих межах. Вихід за ці межі класифікується як метрологічна відмова.

Засоби вимірювальної техніки, що виготовляються або підлягають ремонту, ввозяться з-за кордону, знаходяться в експлуатації та на зберіганні, підлягають метрологічній повірці.

Метрологічна повірка ЗВТ (надалі - повірка) – це встановлення придатності ЗВТ до застосування на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам. Метрологічну перевірку ЗВТ здійснюють згідно з «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність» та ДСТУ 2708-99 «Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення».

Повірку здійснюють органи державної і відомчої служби.

Обов'язковій державній повірці підлягають:

- ЗВТ, що використовуються в органах державної служби;
- ЗВТ, що випускаються з виробництва або використовуються на підприємствах як зразкові;
- ЗВТ, що застосовуються як робочі для вимірювань, результати яких використовуються для обліку матеріальних цінностей, палива, енергії, в торгівлі, для захисту довкілля та охорони праці;
- ЗВТ, що використовуються для вимірювань, результати яких є підставою для реєстрації національних та міжнародних спортивних рекордів.

Відомчій повірці підлягають ЗВТ, що не ввійшли у наведений вище перелік ЗВТ, які підлягають обов'язковій державній повірці. Відомчу повірку здійснюють підрозділи метрологічної служби підприємства. Конкретна номенклатура ЗВТ, що підлягають відомчій повірці, встановлюється відомчою метрологічною службою підприємства і територіальним органом Держстандарту. Право на здійснення метрологічною службою підприємства повірки конкретних видів ЗВТ надається територіальному органу Держстандарту.

Відповідно до Державної системи забезпечення єдності вимірювань повірка може бути первинною, періодичною, позачерговою, інспекційною та експертною.

Первинна повірка виконується вперше після виготовлення ЗВТ або після ремонту, а також при імпорті ЗВТ партіями. Первинній повірці підлягає кожен зразок засобів вимірювальної техніки. Під час випуску з виробництва допускається проводити вибіркову первинну повірку засобів вимірювальної техніки, якщо це передбачено відповідним нормативним документом або методикою повірки. Позитивні результати вибіркової первинної повірки поширюються на всі засоби вимірювальної техніки з партії, яку подають на повірку.

Первинну повірку проводять на місці виготовлення (ремонт) засобів вимірювальної техніки, у наукових метрологічних центрах, територіальних органах ЦОВМ або в повірочних лабораторіях. Місце проведення повірки визначають наукові метрологічні центри, територіальні органи або повірочні лабораторії, які проводять повірку.

Для проведення первинної повірки на місці виготовлення (ремонт) засобів вимірювальної техніки у заявників організують контрольно-повірочні пункти (КПП) територіальних органів або повірочних лабораторій. КПП створюють згідно зі спільним наказом підприємства-заявника та

територіального органу або повірочної лабораторії. Діяльність КПП регламентують положенням про КПП, затвердженим керівниками підприємства-заявника та територіального органу або повірочної лабораторії.

Первинну повірку засобів вимірювальної техніки проводять за договором або письмовим зверненням заявника, яке подають до організації, що проводить повірку, або керівнику КПП.

Періодична повірка виконується протягом експлуатації ЗВТ через встановлений проміжок часу.

Періодичній повірці підлягає кожен засіб вимірювальної техніки, за винятком тих, періодичну повірку яких не передбачено методикою повірки. Засоби вимірювальної техніки, які зберігають та не використовують, можна не піддавати періодичній повірці. У цьому випадку засоби вимірювальної техніки треба піддавати позачерговій повірці безпосередньо до введення в експлуатацію, продажу або видавання напрокат.

Засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, в тому числі ті, які видають напрокат, підлягають періодичній повірці через встановлені міжповірочні інтервали.

Періодичну повірку можна проводити на території заявника, наукового метрологічного центру, територіального органу або повірочної лабораторії. Місце проведення повірки визначає науковий метрологічний центр, територіальний орган або повірочна лабораторія, зважаючи на економічні чинники, можливість транспортування еталонів, допоміжного обладнання та засобів вимірювальної техніки, що повіряють, погоджуючи це рішення з заявником.

Періодичну повірку проводять у календарні терміни, встановлені переліком засобів вимірювальної техніки, які перебувають в експлуатації та підлягають повірці, або за письмовим зверненням заявників.

Порядок подання фізичними особами, які не є суб'єктами підприємницької діяльності, — власниками засобів вимірювальної техніки, результати вимірювання якими застосовують для здійснення розрахунків за спожиті для побутових потреб електричну і теплову енергію, газ і воду, на періодичну повірку цих засобів встановлює Кабінет Міністрів України.

Тривалість перебування засобів вимірювальної техніки на повірці, за умови їх подання відповідно до переліку засобів вимірювальної техніки, які перебувають в експлуатації та підлягають повірці, або письмового звернення, не повинна перевищувати 15 робочих днів після оплати за повірку (за винятком засобів вимірювальної техніки, тривалість повірки яких згідно з методикою повірки перевищує цей термін).

Якщо засіб вимірювальної техніки призначено, щоб вимірювати (відтворювати) декілька фізичних величин, і (або) він має декілька діапазонів вимірювання, але його застосовують для вимірювання (відтворення) меншої кількості фізичних величин або не в усіх діапазонах (чи якщо засіб вимірювальної техніки застосовують лише в окремій частині діапазону вимірювання), то за письмовим зверненням заявника під час періодичної повірки таких засобів вимірювальної техніки дозволено контролювати їхні метрологічні характеристики лише стосовно зазначених фізичних величин і діапазонів (частин діапазонів) вимірювання. У таких випадках свідоцтво про

повідку оформлюють обов'язково. У свідоцтві про повірку роблять відповідний запис щодо особливостей застосування таких засобів вимірювальної техніки.

Позачергова повірка ЗВТ здійснюється раніше терміну чергової періодичної повірки.

Позачергову повірку проводять в таких випадках:

— за потреби заявника пересвідчитись у придатності засобів вимірювальної техніки до застосування;

— у разі пошкодження відбитка повірочного тавра або втрати свідоцтва про повірку;

— у разі застосування засобів вимірювальної техніки як комплектувальних, якщо час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжповірочного інтервалу;

— у випадку продажу (відправлення) споживачеві засобів вимірювальної техніки в тому разі, коли час, що минув після останньої повірки, перевищує половину міжповірочного інтервалу;

— під час уведення в експлуатацію засобів вимірювальної техніки, які пройшли первинну повірку (у разі потреби).

Інспекційна повірка ЗВТ виконується при здійсненні державного нагляду та відомчого контролю за станом і використанням ЗВТ органами метрологічних служб.

Інспекційну повірку засобів вимірювальної техніки проводять у порядку, встановленому нормативно-правовим актом ЦОВМ.

За бажанням представників підприємств, організацій та фізичних осіб — суб'єктів підприємницької діяльності, інспекційну повірку можна проводити за їх присутності.

Результати інспекційної повірки оформлюють довідкою, яку підписують державні повірники (повірники). Форму довідки про результати інспекційної повірки встановлюють у технічному завданні на проведення державного метрологічного нагляду

Вибіркова повірка ЗВТ, що вибрані з партії ЗВТ встановленим чином, виконується за результатами, які визначають придатність усієї партії ЗВТ.

Поелементна повірка – це така повірка, під час якої метрологічні характеристики ЗВТ визначають за метрологічними характеристиками їх окремих частин.

Експертна повірка здійснюється при виникненні спірних питань щодо метрологічних характеристик, справності та придатності ЗВТ до застосування, а також правильності їх експлуатації. Таку повірку виконують органи державної метрологічної служби на основі письмових вимог (заяв) суду, прокуратори, поліції та підприємств.

### **3. Методи метрологічної повірки засобів вимірювальної техніки**

Всі методи метрологічної повірки поділяються на дві групи:

- з використанням зразкового ЗВТ;

- без використання зразкового ЗВТ - автономна перевірка.

Існують п'ять основних різновидів методів повірки, в яких використовується зразковий ЗВТ:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ;
- метод порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ за допомогою компаратора;
- метод прямого вимірювання ЗВТ, що повіряється, величини, що відтворюється зразковою мірою (однозначною або багатозначною);
- метод прямого вимірювання зразковим ЗВТ величини, що відтворюється мірою, що повіряється;
- метод непрямого вимірювання величини, що відтворюється ЗВТ, що повіряється.

Всі методи повірки мають свої особливості, тому то розглянемо їх більш детально:

- метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ є самим найпоширенішим з методів повірки, так як його застосовують в галузі електричних та магнітних вимірювань для повірки приладів прямого перетворення: амперметрів, вольтметрів, ватметрів, частотомірів, омметрів, та в галузі вимірювань механічних величин – для повірки манометрів та витратомірів.

Основою методу є одночасне вимірювання одного й того самого значення фізичної величини зразковим приладом та приладом, що повіряється. За результатами вимірювань порівнюють показання приладу, що повіряється, ХП, з показаннями зразкового приладу, ХЗР, та визначають похибку,  $\Delta$ , приладу, що повіряється.

Перевагами методу є простота реалізації та відсутність складного вимірювального обладнання, недоліком – практична неможливість автоматизації повірки;

- метод порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ за допомогою компаратора використовують при неможливості порівняння показів двох приладів. Наприклад, при порівнянні показів двох вольтметрів, один з яких використовується тільки у колах постійного струму, а другий тільки у колах змінного струму, або при порівнянні розмірів мір магнітних та електричних величин. У схемі повірки застосовується проміжний елемент компаратор, який дає змогу опосередковано порівнювати дві різнорідні або однорідні фізичні величини. Таке порівняння ЗВТ засноване на методі протиставлення або на методі заміщення.

Суть методу протиставлення ґрунтується на оцінюванні результату сумісної дії двох ЗВТ: зразкового та того, що повіряється, на два різні входи двоканального компаратора. Метод заміщення реалізований на порівнянні результатів їх почергової дії на один і той самий вхід компаратора;

- метод прямого вимірювання ЗВТ, що повіряється, величини, що відтворюється зразковою мірою.

Метод реалізований на зміні розміру міри до суміщення покажчика аналогового приладу, що повіряється, з позначкою шкали такого приладу, або до встановлення необхідного показу ХПОВ цифрового приладу, що повіряється, з подальшим визначенням абсолютної похибки,  $\Delta$ , як різниці між показом ЗВТ, що повіряється.

Реалізація такого методу повірки потребує наявності спеціальних зразкових мір, які б відтворювали ту фізичну величину, в одиницях якої проградуєований ЗВТ, що повіряється. Перевагами методу є висока продуктивність повірки, можливість автоматизації, та, як наслідок, це призвело до появи нового різновиду багатозначних мір – калібраторів напруги та струму;

- метод прямого вимірювання зразковим ЗВТ величини, що відтворюється мірою, що повіряється використовується для повірки мір фізичних величин невисокої точності. Значення похибки у такому разі визначається як різниця між номінальним значенням міри, що повіряється, і показом зразкового ЗВТ, який одержаний при прямому вимірюванні розміру цієї міри. Прикладами реалізації такого методу повірки є прямі вимірювання параметрів мір опору, ємності, індуктивності за допомогою мостів постійного та змінного струму, а мір ЕРС – за допомогою компенсаторів постійного струму або компараторів напруг;

- метод непрямих вимірювань величини, що відтворюється ЗВТ, що повіряється використовується у випадку, коли прямі вимірювання застосувати не є можливим або коли непрямі вимірювання є простішими, ніж прямі.

Автономна повірка – це повірка без застосування зразкових ЗВТ та яка виникла для особливо точних ЗВТ, які не можуть бути повірені ні одним з існуючих вище методів внаслідок відсутності ще точніших ЗВТ з відповідними границями вимірювань. Метод автономної повірки найчастіше реалізовується при повірці приладів порівняння. Суть методу – це порівняння величин, що відтворюється окремими елементами схем ЗВТ, що повіряється, з величиною, яка вибрана як базова і відтворюється в самому ЗВТ, що повіряється.

Перевагами автономної повірки є висока точність та оперативність роботи, а недоліками є висока трудомісткість робіт з повірки.

Розглянемо вимоги до зразкових ЗВТ. Вибір зразкових ЗВТ є важливим завданням при організації повірки. В залежності від специфіки, обсягу і змісту повірки для кожного конкретного типу ЗВТ вимоги до вибору зразкових ЗВТ формуються індивідуально, але існують спільні, характерні для всіх ЗВТ, вимоги до вибору ЗВТ, а саме:

- зразковий ЗВТ повинен бути інваріантним до умов вимірювань і властивостей досліджуваних об'єктів, тобто ні умови вимірювань, ні властивості об'єктів не повинні впливати на його метрологічні характеристики;

- зразковий ЗВТ повинен бути призначений для вимірювань тих самих фізичних величин чи параметрів вимірювальних сигналів, що й ЗВТ, що повіряється, або тих величин, які передбачені методом повірки;

- діапазон вимірювань зразкового ЗВТ або діапазон зміни значень зразкової міри повинні бути більшими, ніж діапазон вимірювань ЗВТ, що повіряється.



## **ЛЕКЦІЯ 9**

### **ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ І ПІДСИЛЮВАЧІ**

1. Вимірювальні перетворювачі електричних величин. Загальні положення
2. Резистивні перетворювачі. Подільники напруги
3. Вимірювальні трансформатори струму та напруги
4. Вимірювальні підсилювачі

#### **1. Вимірювальні перетворювачі електричних величин. Загальні положення**

Вимірювальне перетворення. Згідно з Державним стандартом України ДСТУ2681-94 вимірювальне перетворення фізичної величини - це вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у функціонально пов'язану з нею вихідну величину. Вимірювальне перетворення може відбуватися за умови, якщо відомі характеристики похибок перетворення (точність перетворення). Фізичний ефект, на якому основане вимірювальне перетворення, називають принципом вимірювального перетворення. Застосування вимірювальних перетворень як способу передавання вимірювальної інформації (інформації про значення вимірюваної величини) покладене в основу практичної побудови будь-якого вимірювального пристрою.

Фізичною основою вимірювального перетворення є перетворення та передавання енергії, зокрема з перетворенням одного виду енергії в інший або ж без нього. Сьогодні вимірювальне перетворення фізичних величин, зокрема неелектричних, здійснюється переважно як перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну.

До основних переваг таких перетворень належать:

- універсальність, яка полягає в можливості вимірювань кількох чи навіть великої кількості неелектричних величин (із використанням відповідних сенсорів) за допомогою одного електричного вимірювального засобу; простота автоматизації вимірювань завдяки тому, що в електричних колах можна виконувати логічні та цифрові операції;

- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, зумовлена гнучкістю структури та простотою підсилення з електричних сигналів;

- дистанційність, що полягає у можливості вимірювань параметрів досліджуваних об'єктів практично на будь-якій відстані від них завдяки можливості передавання електричних сигналів через проводи лінії зв'язку чи через випромінювання електромагнітних хвиль.

Велика різноманітність вимірюваних фізичних величин, розкиданість досліджуваних об'єктів у просторі, необхідність автоматизації управління за централізованого отримання вимірювальної інформації, опрацювання останньої та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання електричних методів вимірювань найрізноманітніших фізичних величин, оскільки електричні сигнали найпридатніші як для вимірювань, так і для опрацювання та передавання на відстань.

Вимірювання фізичних величин електричними вимірювальними засобами уможлиблюється після попереднього перетворення досліджуваних фізичних величин на функціонально зв'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів.

Отже, для вимірювань фізичних величин електричними методами насамперед потрібний вимірювальний перетворювач.

Згідно з Державним стандартом України ДСТУ 2681-94 вимірювальним перетворювачем (ВП) називають вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення, тобто перетворення вхідної фізичної величини у функціонально зв'язану з нею вихідну величину.

Вимірювальний пристрій (ВПР) - це засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція).

Вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання, називають первинним вимірювальним перетворювачем. Вихідні сигнали вимірювальних перетворювачів мають бути зручними для передавання, подальшого перетворення, оброблення і зберігання інформації. Термін давач, яким часто замінюють термін «вимірювальний перетворювач», Державним стандартом не встановлений. Однак цей термін широко вживають у технічній літературі.

Під терміном давач (англ. sensor, нім. meßgeber, рос. датчик) розуміють окремий вид первинного вимірювального перетворювача, призначеного для перетворення вхідної вимірюваної величини у сигнал, зручний для подальшого перетворення, передавання, вимірювання та зберігання інформації про стан досліджуваного об'єкта.

Термін сенсор зазвичай ототожнюють із терміном давач. Останнім часом усталилась тенденція до мініатюризації засобів вимірювальної техніки та появи мініатюрних сенсорів (мікросенсорів).

Під терміном мікросенсор розуміють мініатюрний сенсор, в якого хоч би один із розмірів є у субміліметровому діапазоні. Подальше зменшення розмірів таких пристроїв у зв'язку із застосуванням нанотехнологій привело до появи наносенсорів. Вимірювальні перетворювачі можуть реалізовуватись по-різному. У найпростішому варіанті - це первинні вимірювальні перетворювачі, метрологічні характеристики яких нормуються. Здебільшого на виході таких сенсорів отримують вимірювальну інформацію у вигляді електричної величини: активної (електрорушійної сили, струму) чи пасивної (активний опір, ємність, індуктивність). Відомі функціонально закінчені вимірювальні перетворювачі, до яких, окрім давача, входять вторинний електричний вимірювальний прилад, а також пристрої спряження (їх ще називають вторинними вимірювальними перетворювачами — лінії зв'язку, вимірювальні підсилювачі, пристрої гальванічного розділення, функціональні перетворювачі, пристрої корекції похибок тощо).

Все частіше з'являються вимірювальні перетворювачі, котрі забезпечують вихідний сигнал у вигляді цифрового коду, тобто в яких використано обчислювальні компоненти і кодові засоби вимірювань.

Для більшості вимірювальних перетворювачів (ВП) характерно вимірювання електричними методами не тільки електричних і магнітних, але й інших фізичних величин. Ці вимірювання здійснюються попереднім перетворенням неелектричної величини в електричну. Такий підхід обумовлено перевагами електричних вимірювань, в першу чергу тим, що електричні сигнали можна легко і швидко передавати на великі відстані, перетворювати в цифровий код, окрім того вони дозволяють забезпечити високу точність і чутливість. Необхідно відмітити, що не завжди вимірювальний перетворювач виконує безпосередньо функції вимірювання. В ряді випадків ВП можна використовувати в якості перетворювача однієї фізичної величини в іншу, найчастіше з неелектричної в електричну.

Наприклад, при вимірюванні рівня рідини поплавков в ємності може бути ричажно зв'язаний з реостатним перетворювачем, ввімкненим в електричне коло. В цьому випадку зміна рівня, яка вимірюється переміщенням поплавка, буде перетворюватись в зміну електричного сигналу (напруги, струму).

Разом з широким розвитком і поширенням електричних методів і засобів вимірювання та управління розробляються і створюються засоби вимірювань і автоматизації, які використовують інші джерела енергії, — пневматичні, гідравлічні. Застосування пневматичних засобів автоматизації доцільно в небезпечних умовах експлуатації (в хімічній, нафтопереробній, харчовій промисловості та ін.), при недостатньому рівні кваліфікації обслуговуючого персоналу (пневматика простіша в обслуговуванні, ніж електроніка), для досягнення малої вартості засобів автоматизації.

Для ефективного функціонування ВП повинні відповідати ряду вимог, основні з яких:

- висока статична і динамічна точність роботи, що забезпечує формування вихідного сигналу з мінімальними викривленнями;

- висока вибірність – датчик повинен реагувати тільки на зміну тієї величини, для якої він призначений;
- стабільність характеристик у часі; відсутність впливу навантаження у вихідному колі на режим вхідного кола;
- висока надійність при роботі в несприятливих умовах зовнішнього середовища;
- повторюваність характеристик (взаємозамінність);
- простота і технологічність конструкції;
- зручність монтажу та обслуговування; низька вартість.

В якості класифікаційних ознак ВП можна прийняти більшість характеристик перетворювачів: вид функції перетворення, вид вхідної і вихідної величин, принцип дії, конструктивне виконання і т.д.

За видом енергії, що використовується, ВП можна поділити на:

- електричні;
- механічні;
- пневматичні;
- гідравлічні.

За співвідношенням між вхідною і вихідною величинами:

– неелектричних величин в неелектричні – перетворювачі розміру тієї або іншої неелектричної величини (важелі, редуктори) або перетворювачі виду вхідної величини (мембрани, пружини і т.д.);

– неелектричних величин в електричні – найбільш багаточисельна і розповсюджена група перетворювачів, якій буде приділено найбільше уваги; – електричних величин в електричні;

– електричних величин в неелектричні – в основному вимірювальні механізми електромеханічних приладів. В залежності від виду вихідного сигналу: – аналогові; – дискретні; – релейні;

– з природним і уніфікованим вихідним сигналом.

За видом функції перетворення:

– масштабні, такі, що змінюють у визначене число разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи;

– функціональні, що виконують однозначне функціональне перетворення вхідної величини зі зміною її фізичної природи або без зміни;

– операційні, що виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання або інтегрування за часовим параметром.

За видом структурної схеми перетворювача:

- прямого однократного перетворення;
- послідовного прямого перетворення;
- диференціальні;
- зі зворотним зв'язком (компенсаційна схема).

За характером перетворення вхідної величини в вихідну:

- параметричні;
- генераторні;
- частотні;
- фазові.

За видом вимірюваної фізичної величини:

- лінійних і кутових переміщень;
- тиску;
- температури;
- концентрації речовин;
- вологості і т.д.

За фізичними явищами, покладеними в основу принципу дії, в державній системі приладів та засобів автоматизації (ДСП) прийнята така класифікація:

- механічні – з пружним чутливим елементом, дросельні, ротаметричні, об'ємні, поплавкові, швидкісні;
- електромеханічні – тензорезистивні, термоелектричні, термомеханічні, термокондуктометричні, манометричні;
- електрохімічні – кондуктометричні, потенціометричні, полярографічні;
- оптичні – фотоколометричні, рефрактометричні, оптико-акустичні, нефелометричні;
- електронні і іонізаційні – індукційні, хроматографічні, радіоізотопні, магнітні.

За динамічними характеристиками ВП розподіляються у відповідності з видом передаточної функції. В залежності від виду статичної характеристики ВП поділяють на реверсивні (двотактні) і нереверсивні (однотактні).

## **2. Резистивні перетворювачі. Подільники напруги**

Шунт – це резистивний вимірювальний перетворювач, який призначений для розширення меж вимірювання магнітоелектричних приладів за струмом. Конструктивно це резистор з чотирма затискачами: струмові затискачі «С» вмикають послідовно в коло вимірюваного струму, а потенціальні затискачі «П» - паралельно до вимірювального механізму чи приладу магнітоелектричної системи з внутрішнім опором, який переважно працює в режимі мілівольтметра, тобто шунт є перетворювачем струму в напругу.

Шунти виготовляють із манганіну у вигляді котушок опору або у формі пластин чи стержнів, запаяних у масивні латунні або мідні наконечники. Шунти поділяються на внутрішні, які входять до складу вимірювального кола приладу і розміщені всередині його корпусу, і зовнішні, які є самостійними вимірювальними перетворювачами. Внутрішні шунти виготовляють переважно на струми до 30 А, а зовнішні - до 10 кА. Зовнішні шунти поділяються на універсальні або взаємозамінні та індивідуальні або частково взаємозамінні. Універсальні шунти можуть використовуватись в комплекті з будь-яким приладом, який має такий самий номінальний спад напруги, як і шунт, а індивідуальні - тільки з конкретними приладами. За призначенням шунти поділяються на стаціонарні та переносні. Як внутрішні, так і зовнішні шунти можуть бути одно- або багатограничними.

Основними метрологічними характеристиками шунтів є: номінальне значення опору  $R_{шн}$ , номінальне значення спаду напруги  $U_{шн}$ , номінальне значення струму  $I_{шн}$  та клас точності. Номінальні значення спаду напруги на шунті  $U_{шн}$  можуть дорівнювати 15; 30; 45; 75; 150; 300 мВ, а номінальний струм, де  $a$  – одне із чисел 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5;  $n$  – ціле число. Похибка внутрішнього шунта – це складова основної похибки приладу, частиною якого є шунт. Зовнішні шунти мають свій клас точності, що

позначається одним числом  $s$ , яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5, і що дорівнює границі допустимої відносної основної похибки шунта.

**Додатковий резистор** – це резистивний вимірювальний перетворювач напруги в струм, який вмикається послідовно з вимірювальним механізмом і призначений для розширення меж вимірювань за напругою вольтметрів магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної систем, а також приладів, що мають кола напруги: ватметрів, фазометрів.

Додаткові резистори виготовляють з манганінового ізолюваного проводу, намотаного на пластини або каркаси із ізоляційного матеріалу. Високоомні додаткові резистори виготовляють із литого мікропроводу в скляній ізоляції. Додаткові резистори, які призначені для використання на змінному струмі, мають біфілярне намотування для одержання безреактивного опору. Додаткові резистори поділяються на внутрішні, які входять до складу вимірювального кола приладу і розміщені всередині його корпусу, і зовнішні, які є самостійними вимірювальними пристроями. Зовнішні додаткові резистори поділяються на універсальні або взаємозамінні та індивідуальні або частково взаємозамінні. Внутрішні додаткові резистори виготовляють на номінальній напруги до 600 В, а зовнішні – до 30 кВ. Як внутрішні, так і зовнішні додаткові резистори можуть бути одно- або багато граничними.

За призначенням додаткові резистори поділяються на переносні та стаціонарні.

**Подільник напруги** – це вимірювальний перетворювач, який призначений для зменшення вимірюваної напруги у задану кількість разів у колах постійного та змінного струму, а також для розширення границі вимірювань за напругою приладів з великим входним опором – цифрових вольтметрів, компенсаторів постійного та змінного струму та компараторів напруг. Основними метрологічними характеристиками подільників напруги є номінальний коефіцієнт поділу  $k_{ПН}$ , номінальні значення входного  $R_{ВХ.Н}$  і вихідного  $R_{ВИХ.Н}$  опорів, максимальне значення входної напруги  $U_{ВХ.max}$  та клас точності.

Максимальне значення входної напруги подільника напруги  $U_{ВХ.max}$  – це найбільше значення напруги, яке можна подавати на вхід подільника напруги при певному значенні коефіцієнту поділу. У вимірювальній техніці застосовують резистивні, ємнісні та індуктивні подільники напруги.

Резистивні подільники напруги виготовляють із манганінового проводу або мікропроводу у скляній ізоляції, які мають високий питомий опір і малий температурний коефіцієнт опору. Значення номінального коефіцієнту поділу резистивних подільників дорівнює 10:1; 100:1; 1000:1; 10000:1. Клас точності резистивних подільників вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1, що дорівнює границі допустимої основної похибки відносної похибки подільника.

**Ємнісні подільники напруги** – це подільники, які здебільшого застосовуються для розширення границь вимірювань електростатичних вольтметрів.

**Індуктивні подільники напруги (ІПН)** – це електромагнітні перетворювачі, які містять одну або декілька обмоток, розміщених на

ферромагнітному осерді, і призначені для зменшення вхідної напруги у задану кількість разів. Принцип роботи ПН оснований на явищі електромагнітної індукції, причому характерною особливістю є наявність між витками обмоток тісного індуктивного зв'язку, коли всі витки обмоток мають однакове потокозчеплення, а потоки розсіювання відсутні. За такої умови відношення напруг, наведених в обмотках подільника, дорівнює відношенню кількості витків відповідних обмоток і не залежить від точності відтворення, стабільності електричних та магнітних параметрів ПН. Для досягнення високого рівня індуктивного зв'язку між обмотками і зменшення потоків розсіювання в ПН застосовують мультифілярний спосіб намотування обмоток: обмотки виготовляють у формі джгута із скручених та ізольованих один від одного проводів, який рівномірно намотують на осердя тороїдної форми, виготовлене із матеріалу з високою магнітною проникністю і малими втратами.

Індуктивні подільники напруги є поширеними та перспективними перетворювачами, які використовуються як самостійні вимірювальні пристрої, так й як блоки засобів вимірювальної техніки, а саме, калібраторів напруг постійного і змінного струму, компараторів напруг постійного і змінного струму, цифрових трансформаторних мостів змінного струму.

### **3. Вимірювальні трансформатори струму та напруги**

**Вимірювальний трансформатор** - це масштабний електромагнітний перетворювач, який призначений для точного перетворення (трансформації) струму чи напруги, для розширення меж вимірювання приладів, а також для захисту персоналу при вимірюваннях у колах високої напруги. У вимірювальній техніці застосовують вимірювальні трансформатори струму (ВТС) та вимірювальні трансформатори напруги (ВТН) для розширення границь вимірювань за струмом та напругою відповідних вимірювальних приладів - амперметрів, вольтметрів, ватметрів, тощо, а також вони дозволяють гальванічно розділити частини вимірювального кола: коло високої напруги від кола вимірювального приладу. За принципом дії та побудовою вимірювальні трансформатори подібні до силових, але відрізняються від них режимом роботи та способом увімкнення у вимірювальне коло. Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих обмоток, які розміщені на ферромагнітних осердях.

Первинна обмотка має число витків  $w_1$ , вторинна –  $w_2$ . Виводи первинної обмотки підключаються до вимірювальних кіл, а до затискачів вторинної обмотки підключають засоби вимірювання. Вторинні кола вимірювальних трансформаторів заземлюють для безпечної роботи обслуговуючого персоналу.

**Вимірювальний трансформатор струму** – це масштабний вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення вимірюваних струмів в стандартні і, як наслідок, для розширення границь вимірювання амперметрів, обмоток струму ватметрів, лічильників електричної енергії та фазометрів у колах змінного струму.

Основними метрологічними характеристиками ВТС є номінальні значення первинного та вторинного струмів, номінальний коефіцієнт трансформації, частота або розширена область частот, клас точності та номінальний опір навантаження вторинного кола.

Номинальне значення первинного струму ВТС вибирають зі стандартного ряду: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 200; ...60000 А. Номинальне значення вторинного струму ВТС переважно дорівнює 5 А, а також для частоти 50 Гц допустимими є значення 1 А та 2 А. Клас точності ВТС позначається одним числом с, яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0.

Клас точності ВТН позначається одним числом с, яке вибирається зі стандартного ряду класу точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10.

**Вимірювальний трансформатор напруги** - це масштабний вимірювальний перетворювач, який застосовують для розширення границь вимірювань за напругою вольтметрів, ватметрів, лічильників електричної енергії та фазометрів у колах змінного струму. Основними метрологічними характеристиками ВТН є номинальна первинна напруга  $U_{1Н}$ , номинальна вторинна напруга  $U_{2Н}$ , номинальний коефіцієнт трансформації, клас точності, номинальне навантаження вторинного кола, частота. Номинальний коефіцієнт трансформації ВТН дорівнює відношенню номинальної первинної напруги  $U_{1Н}$ , до номинальної вторинної напруги  $U_{2Н}$ .

Вимірювальний трансформатор напруги за своєю будовою та принципом дії аналогічний силовому трансформатору. Обмотка вищої напруги включається до кола паралельно, а до вторинної обмотки з меншим числом витків підключаються вимірювальні прилади. Змінний струм, який протікає по первинній обмотці, призводить до появи в магнітопроводі змінного магнітного потоку. Цей потік перетинає витки обмоток первинної та вторинної напруги створює в них ЕРС  $E_1$  та  $E_2$ . Під впливом  $E_2$  в вторинному колі при підключенні приладів протікає струм, сила якого пропорційна напрузі  $U_1$ .

Характерною особливістю трансформатора напруги є великий опір приладів, що включаються до вторинного кола, унаслідок чого трансформатор напруги працює в умовах, близьких до холостого ходу. ВТН у вимірювальних колах використовуються у разі, коли вимірювальна напруга більша, ніж межа вимірювання вольтметра або іншого вимірювального приладу.

#### **4. Вимірювальні підсилювачі**

Вимірювальні підсилювачі (ВП) – це засоби вимірювальної техніки, які призначені для підсилення електричних сигналів та для підвищення чутливості засобів вимірювань з одночасним послабленням впливу неінформативних параметрів. Вони зменшують споживання енергії від досліджуваного об'єкта та застосовуються для узгодження опорів перетворювачів у разі їх спряження, зокрема, якщо потрібно під'єднати низькоомний опір навантаження до високоомного джерела сигналу.

Вимірювальні підсилювачі є не тільки масштабними перетворювачами напруги, але й перетворювачами напруги на струм або струму на напругу. Узагальнену структурну схему вимірювального підсилювача можна подати у вигляді підсилювального елемента (підсилювача), охопленого колом від'ємного зворотного зв'язку.

Завдяки досягненням сучасної мікроелектронної техніки підсилювальні елементи виконують здебільшого у вигляді інтегральних мікросхем. Такі підсилювачі прийнято називати операційними підсилювачами (ОП), які



розглядаються як елемент з двома входами: інвертуючим та неінвертуючим, до яких подаються, відповідно, напруги  $U_{вх1}$  та  $U_{вх2}$ .

Крім коефіцієнта підсилення та входних опорів, важливими технічними характеристиками операційного підсилювача є частота одиничного підсилення, максимальна швидкість наростання вихідної напруги, коефіцієнт послаблення синфазного сигналу напруги, еквівалентна вхідна напруга шумів, вхідна напруга зміщення та вхідні струми.

Частота одиничного підсилення – це частота вхідного сигналу, який перетворює операційний підсилювач з коефіцієнтом  $k_U = 1$ .

Максимальна швидкість наростання вихідної напруги – це найбільша швидкість зміни вихідної напруги під час подачі на його входи імпульсу прямокутної форми максимально допустимої амплітуди.

Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу – це відношення коефіцієнту підсилення  $k_U$  до коефіцієнта передавання на вихід операційного підсилювача синфазного сигналу.

Вхідна напруга зміщення – це диференціальна постійна напруга, після прикладення до входів операційного підсилювача на його виході встановлюється напруга, що дорівнює нулю.

Сучасні вимірювальні операційні підсилювачі поділяють на дві групи: універсальні та спеціальні.

До універсальних вимірювальних операційних підсилювачів належать підсилювачі середньої точності, з середньою швидкодією та смугою пропускання сигналів. Такі підсилювачі оптимізовані за статичними і динамічними параметрами, а саме – вхідними струмами в десятки – сотні наноампер, коефіцієнтом послаблення синфазної складової вхідної напруги не менше, ніж 80...90 дБ, частотою одиничного підсилення до 5 МГц, швидкістю наростання вихідної напруги до 5...10, вхідною напругою зміщення у межах кількох мілівольт і її температурною зміною до десятків мікрвольт на градус, вхідною напругою шумів у одиниці мікрвольт у смузі 10 Гц...10 кГц. Завдяки названим параметрам ОП середньої точності надзвичайно широко застосовують для виконання як вимірювальних, так і контрольних функціональних завдань. До цієї численної групи належать також мікропотужні та програмовані ОП. Перші характеризуються малими напругами живлення та мікроспоживанням, що робить їх незамінними у портативній і мініатюрній апаратурі. У програмованих підсилювачах за допомогою спеціального відводу можна регулювати режим роботи входних каскадів і тим самим змінювати ширину частотної смуги та потужність споживання самих ОП.

До другої групи – спеціальних операційних підсилювачів – належать швидкодіючі та прецизійні підсилювачі.

Швидкодіючі – це підсилювачі з великою шириною частотної смуги (частота одиничного підсилення до 500 МГц) та найкращими динамічними параметрами (швидкість наростання вихідної напруги – сотні вольт за мікросекунду і час встановлення її – одиниці мікросекунд з точністю до десятих часток відсотка).

Прецизійні операційні підсилювачі – це спеціальні підсилювачі, для мінімізації певного масиву параметрів яких вжито схемних, структурно – алгоритмічних та конструкторських заходів. Результатом цього є забезпечення

в них вхідних струмів в десятки – сотні пікоампер; коефіцієнта послаблення синфазної складової вхідної напруги до 120 дБ; вхідної напруги зміщення у одиниці – сотні мікрвольт у разі її температурної зміни в одиниці мікрвольт на градус; вхідної напруги шумів, меншої за 1 мкВ. Однак такі операційні підсилювачі мають обмежену частотну смугу сигналів – частоту одиничного підсилення не вище, ніж 0,5 МГц та низьку швидкість наростання вихідної напруги – частка вольт за мікросекунду.

Для того щоб поліпшити метрологічні характеристики операційних підсилювачів їх охоплюють колами від'ємного зворотного зв'язку, що дає змогу наблизити до ідеальних значення їх вхідного чи вихідного опорів, підвищити стабільність коефіцієнту підсилення у вибраній частотній смузі вхідних сигналів.

## ЛЕКЦІЯ 10

### МІРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1. Міри фізичних величин. Загальні положення. Основні вимоги до мір фізичних величин
2. Міри електричного опору
3. Міри індуктивності та взаємної індуктивності
4. Міри ємності

#### **1. Міри фізичних величин. Загальні положення.**

Міра - це вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого розміру. Наприклад, нормальний елемент - міра ЕРС постійного струму; кварцовий генератор - міра частоти електричних коливань. Основними метрологічними характеристиками міри є її номінальне значення та клас точності. Номінальним значенням міри хн називають значення фізичної величини, яке вона повинна відтворювати і яке вказане на ній або приписане їй. Наприклад, кілограмова гиря має номінальне значення 1 кг, стоомна вимірювальна котушка електричного опору має номінальне значення 100 Ом. Крім номінального, розрізняють істинне та дійсне або умовно-істинне значення міри. Істинне значення міри - це значення фізичної величини, що відтворюється мірою у певних умовах її застосування. Воно відрізняється від номінального значення не тільки назвою, але й тим, що воно дорівнює розміру фізичної величини, який існує об'єктивно, в той час як номінальне значення має умовний характер. Дійсне або умовно-істинне значення міри - значення відтворюваної мірою фізичної величини, знайдене вимірюванням з такою точністю, що для певної мети, наприклад, метрологічної перевірки міри, ним можна замінити її істинне значення. Очевидно, що дійсне значення міри може відрізнятися від її номінального значення внаслідок неточності виготовлення міри і через наявність похибок вимірювання відтворюваної мірою величини.

За кількістю відтворюваних розмірів міри поділяються на однозначні та багатозначні, за характером використання - на переносні, стаціонарні та встановлювальні, за видом фізичної величини - на міри фізичних величин.

Однозначна міра - це міра, що відтворює фізичну величину одного розміру. Наприклад, вимірювальна котушка електричного опору, нормальний елемент, конденсатор сталої ємності, гиря 1 кг.

До однозначних мір належать, зокрема, калібри, тобто міри, що відтворюють геометричні розміри елементів виробу і призначені для порівняння з ними розмірів, форми і розміщення поверхонь елементів виробу для визначення їх придатності. Наприклад, калібри для контролю гладких циліндричних поверхонь (валів, втулок) називають снобами, а для контролю отворів - корнами.

Багатозначна міра - міра, що відтворює фізичну величину різних розмірів. Наприклад, конденсатор змінної ємності, штрихова міра довжини

(лінійка), магазин електричного опору. Багатозначні міри виготовляють у формі наборів мір, магазинів мір та калібраторів.

Набір мір - комплект конструктивно відокремлених мір різного розміру однієї і тієї самої фізичної величини. Наприклад, набір гир, набір калібрів, набір резисторів.

Міри, що входять в набір, можуть використовуватися як окремо, так і в різних комбінаціях для відтворення ряду розмірів цієї фізичної величини.

Магазин мір - набір мір, конструктивно об'єднаних в одне ціле з пристроєм для вмикання їх у різних комбінаціях. Наприклад, магазини електричного опору, індуктивності, ємності.

Калібратор - багатозначна керована електронна міра, призначена для відтворення ряду розмірів однієї і тієї самої фізичної величини із заданою точністю та дискретністю. Наприклад, калібратори напруги постійного струму, сили постійного струму, електричного опору постійного струму.

Міра переносна - міра, яка являє собою автономний вимірювальний пристрій як у конструктивному виконанні, так і в застосуванні у вимірювальних операціях. Наприклад, набір гир, нормальний елемент, магазин електричного опору.

Міра стаціонарна - міра, конструктивно вмонтована у засіб вимірювальної техніки і є елементом його вимірювальної схеми або призначена для його метрологічної перевірки. Наприклад, однозначна міра електричного опору, вмонтована в міст постійного струму; нормальний елемент, вмонтований у компенсатор постійного струму.

Міра установча - міра, призначена для встановлення показу або вихідного сигналу засобу вимірювальної техніки відповідно до її відомого значення або для контролю незмінності чутливості засобу вимірювальної техніки і встановлення його показу (або вихідного сигналу) відповідно до показу, що відповідає чутливості ЗВТ при первинному градуванні. Наприклад, кінцева міра довжини, яка використовується для настроювання мікрометричної скоби з нижньою границею вимірювання, що не дорівнює нулю; нормальний елемент, який застосовується для калібрування вольтметрів постійного струму чи встановлення робочого струму в компенсаторах постійного струму.

Міра фізичної величини - міра, призначена для відтворення та (або) збереження фізичної величини одного або декількох заданих розмірів, значення яких виражені в установлених одиницях і відомі з необхідною точністю. За видом фізичної величини міри розділяють на міри електричних, магнітних, теплових, механічних та інших величин.

У вимірювальній техніці поширені такі міри електричних величин, як міри електрорушійної сили постійного струму, міри напруги та сили постійного і змінного струму, міри електричного опору, міри індуктивності та взаєміндуктивності та міри ємності. До мір електричних величин ставлять загальні вимоги, найважливішими з яких є: стабільність параметрів міри в часі і висока точність підгонки дійсного значення міри до номінального. Особливо

важливо забезпечити стабільність параметрів міри. Похибка підгонки параметрів може бути визначена під час атестації або метрологічної перевірки міри і врахована введенням поправок, а похибка, спричинена нестабільністю параметрів міри, виключенню не піддається і входить у остаточний результат вимірювання. Міри повинні мати мінімальне значення залишкових (паразитних) параметрів, тобто мінімальну індуктивність та ємність для мір електричного опору, мінімальний активний опір та міжвиткову ємність для мір індуктивності тощо. Наявність залишкових параметрів призводить до залежності значення міри від частоти і форми кривої змінного струму, тобто викликає появу частотної похибки і, як наслідок, необхідність атестації міри за різних частот та форм кривої струму. З інших вимог слід відзначити малу залежність значення міри від умов експлуатації та можливість урахування цього впливу; мінімальну термо-ЕРС матеріалу міри в парі з міддю; простоту конструкції та зручність застосування, малі розміри і масу тощо. Крім цих загальних вимог, до конкретних мір ставлять специфічні вимоги, які залежать як від виду міри, так і від умов її застосування: виду струму, його значення тощо.

## 2. Міри електричного опору

**Мірами електричного опору** у колах постійного та змінного струму є: вимірювальні котушки електричного опору (однозначні міри електричного опору) та магазини опору (багатозначні міри електричного опору). Характеристики таких мір залежать від матеріалу і технології виготовлення їх резистивних елементів. До мір електричного опору висуваються такі *вимоги*: висока точність підгонки дійсного значення опору міри до номінального, висока відтворюваність опору міри і його стабільність в часі, малий температурний коефіцієнт опору та мінімально можлива термоелектрорушійна сила в парі з міддю.

Розглянемо однозначну міру електричного опору, якою є вимірювальна котушка, що містить резистивний елемент (чотиризатискачевий резистор) в формі обмотки (при великому опорі), яка намотана на каркас або в формі спіралі чи петлі (при малому опорі). Виводи резистивного елемента приєднані до струмовиводів, які змонтовані на ізоляційній панелі. На струмопровідних колодках розміщені струмові затискачі для вмикання до кола струму та потенціальні затискачі для знімання спаду напруги вимірювального кола. Для зменшення реактивної складової опору вимірювальних котушок застосовують спеціальні види намотування резистивного елемента і систему екранування для забезпечення сталості розподілення ємностей обмотки.

Основними метрологічними характеристиками однозначної міри електричного опору є: клас точності, номінальне і дійсне значення опору міри, номінальне та максимальне значення потужності розсіювання. У метрологічній практиці, окрім однозначних мір, використовують багатозначні міри електричного опору. Багатозначна міра електричного опору – це магазин опору, який за конструкцією є набором резисторів, які об'єднані

перемикальним пристроєм, що забезпечує їх вмикання в різних комбінаціях і з потрібним значенням опору. Основним вузлом магазину опору є *декада* – це ряд послідовно з'єднаних резисторів, які конструктивно об'єднані перемикальним пристроєм. Кожній декаді відповідає певний десятковий розряд магазину і за допомогою її перемикача можна набрати від 0 до 20 (або до 9 чи 11) одиниць певного розряду. Багатозначні міри в залежності від конструкції перемикальних пристроїв бувають *штупсельні* та *важільні*.

Таблиця 1

Метрологічні характеристики однозначної міри  
електричного опору

Метрологічна характеристика	Означення
Клас точності	Клас точності дорівнює границі допустимої основної відносної похибки міри. Значення класу точності вибирають із ряду 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2.
Номінальне значення опору	таке значення опору, яке вказане на мірі або приписане їй. Вибирають із ряду $10 n \text{ Ом}$ , де $n$ – ціле число в діапазоні від мінус 5 до плюс 16.
Дійсне значення опору	таке значення опору, яке визначене під час метро-логічної перевірки міри і вказане в паспорті або в свідоцтві про перевірку. Таке значення опору визначають з похибкою, не більшою від $1/5$ від класу точності міри.
Стабільність	характеризується зміною її опору за один рік та виражена у відсотках від номінального значення. Ця зміна для мір високих класів точності дорівнює класу точності міри, для менш точних мір стабільність опору не нормується.
Номінальна потужність розсіювання	така потужність, яка розсіюється мірою, за якої похибка не перевищує границі допустимої основної похибки і за якої допускається визначення дійсного значення опору міри при метрологічній перевірці. Номінальна потужність дорівнює $0,1 \text{ Вт}$ для мір зі значенням опору $205 \text{ Ом}$ .
Максимальна потужність розсіювання	така потужність, за якої допускається застосування міри у вимірювальних колах, але виникає додаткова похибка, яка не повинна перевищувати значення, що чисельно дорівнює класу точності міри. Максимальна номінальна потужність дорівнює $1 \text{ Вт}$ для мір зі значенням опору $205 \text{ Ом}$ .

Основними метрологічними характеристиками магазину опорів є клас точності, максимальний опір, кількість декад, опір одного ступеня молодшої декади, номінальна і допустима потужність на один ступінь опору декади, початковий опір, варіація початкового опору, а також стала часу і верхня границя частотного діапазону для магазинів опору, які використовуються в колах змінного струму. У практиці електричних вимірювань використовуються магазини опорів, в яких клас точності дорівнює 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2, номінальний опір одного ступеня молодшої декади дорівнює 0,01 або 0,1 Ом, старшої декади – 103 або 104 Ом, при цьому номінальна і допустима потужність одного ступеня опору декади – 0,1 Вт, а допустима потужність – 0,5 Вт.

### **3. Міри індуктивності та взаємної індуктивності**

Основними вимогами до мір індуктивності є стабільність параметрів, мінімальний активний опір, незалежність індуктивності від значення струму через неї, мала залежність від частоти струму та температури довкілля. Усі вимоги забезпечуються як конструктивно, так і вибором відповідних матеріалів. Котушки індуктивності виготовляють у вигляді намотки з мідного проводу на ізоляційних каркасах. Мале значення залишкових параметрів отримують, використовуючи каркаси з матеріалів з магнітною проникністю, близькою до одиниці – фарфор, кераміка та кварцове скло.

Для зменшення активного опору та частотних похибок за рахунок поверхневого ефекту застосовують багатоважильний мідний провід з ізольованими жилами. Для зменшення впливу зовнішніх електромагнітних полів на індуктивність використовують тороїдні конструкції, а для збільшення опору ізоляції обмотки котушок просочують спеціальними технічними оливами та заливають масою для фіксації. Зменшення впливу температури довкілля на значення міри досягається завдяки підбору матеріалів окремих конструктивних елементів міри із однаковими (приблизно) температурними коефіцієнтами лінійного розширення. Найпоширеніші котушки індуктивності мають номінальне значення індуктивності від 1 мкГн до 1 Гн, клас точності від 0,02 до 0,2, а верхню границю частоти змінного струму до 100 кГц.

Котушки взаємоіндуктивності за своєю будовою ідентичні з котушками індуктивності і відрізняються від них наявністю другої обмотки, первинна і вторинна обмотки можуть бути намотані роздільно або сумісно. Кількість витків обох обмоток вибирають такою, щоб номінальне значення індуктивності кожної із обмоток дорівнювало значення їх взаємної індуктивності. Найпоширеніші котушки взаємоіндуктивності мають номінальне значення міри від 100 мкГн до 10 Гн, верхню границю основної допустимої похибки Варіометри є багатозначними мірами індуктивності  $L$  та взаємоіндуктивності  $M$  з безперервною зміною  $L$  та  $M$ . Вони містять дві котушки – рухому (ротор) та нерухому (статор), при повороті ротора змінюється параметр  $L$  та  $M$ . Для варіометрів індуктивності ротор і статор

з'єднані послідовно в одне електричне коло, а у варіометрів взаємної індуктивності – у різні електричні кола. %, 1,0.

Магазини індуктивності і взаємоіндуктивності – це набори котушок сталої індуктивності чи взаємної індуктивності, які конструктивно об'єднані в одному корпусі із штепсельним або важільним перемикальним пристроєм.

Основними метрологічними характеристиками мір індуктивності і мір ємності взаємної індуктивності є: номінальне значення індуктивності  $L_N$  та взаємної індуктивності  $M_N$  – для однозначних мір, максимальне значення  $L_{max}$  та  $M_{max}$  – для багатозначних мір, клас точності.

Клас точності однозначних мір індуктивності та взаємної індуктивності, варіометрів позначають одним числом  $c$  та вибирають з ряду: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Клас точності магазинів індуктивності і взаємної індуктивності позначають у вигляді відношення  $c/d$  та вибирають з ряду: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0.

Границі допустимої відносної основної похибки  $\delta L_{gr}$  та  $\delta M_{gr}$ , яка виражена у відсотках від номінального значення відповідно, індуктивності та взаємної індуктивності, визначається за формулами.

#### 4. Міри ємності

Міри ємності – це вимірювальні конденсатори постійної ємності (однозначні міри ємностей) та конденсатори змінної ємності (багатозначні міри), магазини ємності та імітатори ємності. До мір ємності висуваються такі вимоги: мінімальна залежність ємності від температури, часу, частоти і форми кривої струму, малий тангенс кута діелектричних втрат, великий опір і висока електрична міцність ізоляції.

Для побудови однозначних та багатозначних мір ємностей застосовують вимірювальні повітряні конденсатори та конденсатори із слюдяним, плівковим та керамічним слюдяним твердим діелектриком. Повітряним конденсаторам сталої ємності властива висока стабільність ємності у часі, малий кут витрат і малий температурний коефіцієнт ємності, але через малу діелектричну проникність повітря вони є громіздкими. Повітряні конденсатори змінної ємності конструктивно складаються з двох систем пластин – нерухомої (сталої) та рухомої (ротор) та шкали. Найпоширеніші повітряні конденсатори сталої ємності виготовляють з номінальними значеннями від 50 до 4000 пФ, класу точності 0,05, їх можна використовувати у частотному діапазоні до 100 Гц і за напруги до 200 В.

Найпоширеніші повітряні конденсатори змінної ємності класів точності від 0,05 до 0,5 з максимальним значенням ємності 15...150 пФ у частотному діапазоні до 100 Гц і робочою напругою до 200 В.

У слюдяних конденсаторах електродами є алюмінієва або олов'яна фольга, а іноді – тонкий шар срібла, який нанесений на слюду. Слюдяні конденсатори компактні, їм властива, як і повітряним конденсаторам, висока



стабільність ємності в часі і малий температурний коефіцієнт ємності, але дещо більший кут витрат.

Найпоширенішими є міри ємності з номінальними значеннями ємності від 1 пФ до 1 мкФ, класів точності від 0,05 до 0,2, які розраховані на частотний діапазон від 40 до 105 Гц. У конденсаторах зі значенням ємності понад 1 мкФ як діелектрики використовують полімерні плівки.

Магазини ємності – це набір конденсаторів сталої ємності, які конструктивно об'єднані в одному корпусі із штепсельними або важільним перемикальним пристроєм.

**ЛЕКЦІЯ 11**  
**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ І МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ**  
**ПРИЛАДИ**

1. Електромеханічні вимірювальні прилади
2. Магнітоелектричні вимірювальні прилади, загальні положення
3. Магнітоелектричні амперметри і вольтметри
4. Магнітоелектричні омметри

### **1. Електромеханічні вимірювальні прилади належать до аналогових засобів вимірювання**

Аналогові вимірювальні прилади – це засоби вимірювання, в яких візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою шкали та покажчика.

Електромеханічні прилади – це аналогові вимірювальні прилади, в яких вхідна електрична величина перетворюється в лінійне або кутове переміщення рухомої частини вимірювального механізму. Вони прості, надійні, зручні в експлуатації, недорогі і, в зв'язку, з цими якостями знайшли широке застосування. Як було зазначено, електромеханічні аналогові прилади прямої дії складаються з вимірювального кола, з вимірювального механізму та з пристроєм відліку. У вимірювальному колі здійснюється кількісне чи якісне перетворення вимірюваної електричної величини  $X$  в електричну  $X'$ , яка діє на вимірювальний механізм та яка зручна для вимірювань. Вимірювальне коло може містити вимірювальні перетворювачі (подільники напруги, шунти, додаткові резистори, вимірювальні трансформатори), які дають змогу розширити границі вимірювань приладів.

Вимірювальний механізм призначений для перетворення електромагнітної енергії сигналу в кут повороту рухомої частини  $\alpha$ , та, який складається з нерухомої та з рухомої частин. Рухома частина встановлюється на кернах, розтяжках та підвісах.

Керни – це два сталеві кускові стержні з загостреними кінцями, які контактують з підп'ятниками, при цьому створюється тертя в опорах. Розтяжки та підвіси – це стрічечки з пружних матеріалів, при цьому усувається тертя в опорах.

Пристрій відліку містить шкалу з поділками та покажчик (механічний – стрілка або світловий – плямка), який зв'язаний з рухомою частиною вимірювального механізму. Краща об'єктивність відліку показів забезпечується світловими пристроями відліку, а також стрілочними пристроями з антипаралаксними елементами (шкала із дзеркалами).

Статична рівновага рухомої частини вимірювального механізму при нехтуванні тертя в опорах настає за рівності обертового та протидіючого моментів.

Моменти, що діють на рухому частину вимірювального механізму приладу	Умови виникнення моменту
--	--------------------------

1.Обертальний момент, $M_{об}$	Момент створюється електромагнітною енергією $W_e$ та виникає від дії вимірюваної величини і повертає рухома частину на кут $\alpha$ у бік зростання показів
2. Протидіючий момент, $M_{пр}$	Момент виникає в результаті повороту рухомаї частини з одночасним закручуванням пружини, яка й створює протидіючий момент, що пропорційний куту повороту $\alpha$
3. Момент заспокоєння, $M_z$	Момент характеризує процес гальмування, яке виникає при обертанні рухомаї частини механізму в результаті тертя його рухомих частин з повітрям та в результаті електромагнітних процесів
4. Момент тертя, $M_{тр}$	Момент виникає при встановленні рухомаї частини механізму на осі, що закінчуються кернами

Статична рівновага рухомаї частини вимірювального механізму при нехтуванні тертя в опорах настає за рівності обертального та протидіючого моментів

Залежно від принципу дії вимірювального механізму – від принципу перетворення електромагнітної енергії вимірювального сигналу в механічну енергію рухомаї частини і виду функції перетворення, електромеханічні аналогові вимірювальні прилади поділяються на такі **системи**: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, електростатичну та індукційну.

## 2. Магнітоелектричні вимірювальні прилади, загальні положення

Принцип дії магнітоелектричних вимірювальних приладів полягає у взаємодії поля постійного магніту з магнітним полем рамки (котушки), по якій протікає вимірюваний струм.

Основні елементи конструкції магнітоелектричного вимірювального приладу наведена на рисунку. Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя – це магнітна система магнітоелектричного вимірювального механізму. В рівномірному проміжку між полюсними наконечниками постійного магніту і осердям створюється сильне радіально-рівномірне магнітне поле, в якому знаходяться дві сторони рухомаї котушки з мідної або алюмінієвої проволочи. По виткам котушки протікає постійний струм, який пов'язаний з вимірюваним струмом чи напругою.

Цей струм підводиться до котушки через дві спіральні пружини. Котушка закріплена між двома напівосями, на одній з яких закріплений стрілочний покажчик, кінець якого переміщується над шкалою приладу. Магнітне поле постійного магніту взаємодіє з тими частинами котушки, що знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, як наслідок, створюється обертальний момент, який намагається повернути котушку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. При повороті котушки на кут  $\alpha$  закручуються спіральні пружини і створюється протидіючий момент. Поворот котушки припиниться, коли

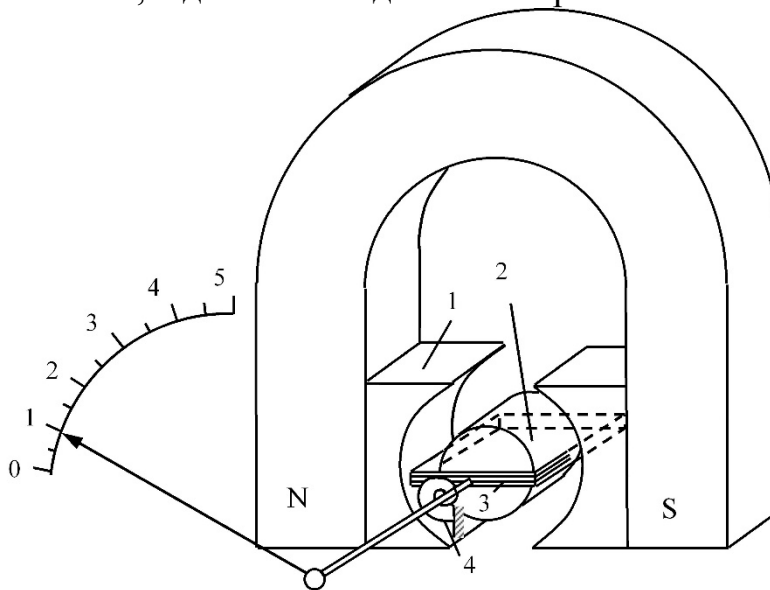
протидіючий момент стане рівним обертовому моменту, при такому стані рухомої частини приладу за положенням стрілочного покажчика над шкалою оператором визначається значення вимірюваної величини.

Чутливість  $SI$  є сталою величиною, значення якої визначається тільки геометричними розмірами механізму і не залежить від сили струму  $I_0$ , як наслідок, шкала магнітоелектричного приладу є рівномірною.

Порівняно з аналоговими електромеханічними вимірювальними приладами інших систем магнітоелектричні прилади мають такі *переваги*:

- найвищу точність вимірювання на постійному струмі – найвищий клас точності 0,05;
- найвищу чутливість, яка забезпечує широкий діапазон вимірювань струму та напруги;
- найменше споживання потужності (десяті частки Вт), так як у амперметрів малий внутрішній опір, а у вольтметрів внутрішній опір великий;
- рівномірний лінійний характер шкали приладу;
- малий вплив на покази приладів зовнішніх магнітних полів.

До *недоліків* відносять такі параметри: неможливість вимірювання змінних струмів (без додаткових перетворювачів), мала здатність до перевантажень, відносна складність вимірювального механізму.



Принцип дії приладу магнітоелектричної системи

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

Напрямок обертового моменту приладу визначається правилом лівої руки. При зміні напрямку струму змінюється і напрям обертового моменту. При змінному струмі на рухома частину приладу діють швидко змінні моменти протилежної дії. Їх результуюча дія не змінить положення рухомої частини приладу і стрілка залишиться на нульовій поділці шкали (або буде трошки вібрувати). Тому прилади магнітоелектричної системи використовують для вимірювання постійного струму.

Вимірювання змінного струму за допомогою магнітоелектричного механізму можливе тільки після попереднього випрямлення або перетворення його у постійний струм (наприклад термоперетворювач).

Магнітоелектричні прилади дуже чутливі. Тому у гальванометрі у більшості використовують цю систему. Висока чутливість приладу забезпечує достатній запас міцності, шляхом зменшення густини струму у струмопровідних частинах. Тому прилади магнітоелектричної системи витривалі до перевантажень. Цьому сприяє також лінійна залежність обертового моменту приладу від струму, а не квадратична, яка характерна для більшості інших систем приладів. Оскільки у магнітоелектричних приладах сильне власне магнітне поле, то зовнішні магнітні поля мало впливають на їх покази.

У наслідок високої чутливості власне споживання енергії магнітоелектричними приладами відносно мале (від  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  Вт). У приладах магнітоелектричної системи з рухомих магнітом обертовий момент діє на рухомий постійний магніт, а котушка з вимірювальним струмом нерухома. Пружини замінює сила додаткового постійного магніту, який встановлюється на корпусі приладу у безпосередній близькості від рухомого постійного магніту. Ці прилади прості за будовою і дуже стійкі до механічних перевантажень та дешеві, але точність їх мала через неоднорідність магнітного поля.

### **3. Магнітоелектричні амперметри і вольтметри**

**Амперметри** — це прилади для вимірювання електричних струмів. Залежно від величини вимірюваного струму можуть бути дещо відмінними і їхні назви: міліамперметр, мікроамперметр.

Міліамперметр має границю вимірювань струму меншу, ніж один ампер, а мікроамперметр — навіть меншу за один міліампер.

Деякі прилади використовують і для вимірювання значних струмів — кілоамперметри. Слід зауважити, що у міліамперметрів і мікроамперметрів вимірювані струми справді протікають безпосередньо через прилади: у амперметрів — на значні струми, а у кілоамперметрів струм, що позначений на них, ніколи не протікає через коло приладу.

Для вимірювань цими приладами необхідне обладнання, яке б нормовано зменшувало вимірюваний струм до величини, прийнятної для самого вимірювального приладу. При вимірюванні змінного струму — це вимірювальні трансформатори струму, при вимірюванні постійного — це вимірювальні шунти.

Для вимірювання струму використовують також і гальванометри. Це високочутливі електровимірювальні прилади, призначені для вимірювання струмів дуже малої величини — десь від кількох мікроампер до  $10^{-11}$  А.

Але основне призначення гальванометрів є все ж не вимірювання, а визначення режиму відсутності струму при нульових (зрівноважувальних) методах вимірювань у потенціометричних і мостових схемах.

Амперметри можуть бути виконані на основі вимірювальних механізмів:

- електромагнітної (найпростіші);
- магнітоелектричної;
- електродинамічної;
- феродинамічної або теплової систем.

Електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні та теплові амперметри здатні вимірювати постійні та змінні струми. Магнітоелектричні ж амперметри використовують для вимірювання постійного струму. Для вимірювань на змінному струмі ці прилади використовують з напівпровідниковими випрямлячами, але клас точності вимірювань при цьому відносно невисокий (2,5...4,0).

Амперметр електромагнітної системи — це найпростіший і найнадійніший прилад, що може працювати як у колах постійного, так і змінного струму. Струмopовідною у нього є лише обмотка нерухомої котушки, що приєднана до затискачів приладу.

Переносні електромагнітні амперметри у більшості випадків виконують на дві границі вимірювання. Це досягається відносно простим способом — намоткою котушки двома паралельними проводами і вмиканням цих двох секцій обмотки послідовно для вимірювання меншого струму  $i$ , паралельно, для вимірювання більшого струму. Границі вимірювання перемикають перемикачами. Схему амперметра з двома границями вимірювання на номінальні струми 5 і 10 А.

Для розширення границь вимірювання, електромагнітні амперметри ніколи не використовують з шунтами, але ними часто користуються з трансформаторами струму.

Магнітоелектричні амперметри значно складніші й дорожчі за електромагнітні. У них обмотки рамок, що створюють обертовий момент у приладах, розраховані на струми лише у десятки — сотні міліампер, через наявність підводу до них струму через пружини, що мають дуже малу площу поперечного перерізу і нездатні пропускати більш значний струм. Тому ці прилади завжди мають внутрішній шунт, що пропускає через себе більшу частину струму. Коло ж рамки вимірювального механізму тут використано як мілівольтметр, що вимірює падіння напруги на цьому шунті, пропорційне величині струму, який проходить через шунт. Шкалу такого приладу градуюють у амперах, якщо прилад має одну границю виміру. Але часто магнітоелектричні амперметри виготовляють з універсальними шунтами, придатними для користування з декількома границями вимірів. У цьому разі шкалу градуюють лише неіменованими поділками.

У всіх магнітоелектричних амперметрах, послідовно з обмоткою рамки, ввімкнено резистор, виконаний з манганіну. Це суттєво зменшує похибку приладу, спричинену нагрівом обмотки рамки як протіканням власного струму, так і зміною температури довкілля.

Електродинамічні амперметри в основному використовують як зразкові електровимірювальні прилади. Виготовляють їх на основі електродинамічного вимірювального механізму. Вони однаково придатні як для вимірів на постійному, так і на змінному струмі. Ці прилади за будовою значно складніші за електромагнітні й споживають більшу потужність.

Вольтметр — це прилад для вимірювання ЕРС чи напруги в електричних колах. Він приєднується паралельно з устаткуванням, де бажано виміряти якусь з цих величин.

Вольтметри виконують на основі:

- магнітоелектричних;
- електродинамічних;
- феродинамічних;
- електромагнітних;
- теплових;
- електростатичних вимірювальних механізмів.

Магнітоелектричні вольтметри використовують для вимірів напруг постійного струму. Електродинамічні та електростатичні вольтметри можуть бути використані для вимірювань як на постійному, так і на змінному струмах. Електромагнітні й феродинамічні вольтметри при використанні відповідних матеріалів при їх виготовленні (наприклад, пермалою) та при відповідній технології обробки цих матеріалів також можуть бути використані як на постійному, так і на змінному струмах.

Обмотки вимірювальних механізмів вольтметрів магнітоелектричної, електродинамічної, феродинамічної та електромагнітної систем намагаються виконати з якомога більшою кількістю витків, щоб одержати відхилення покажчика вольметра до кінцевої позначки шкали при можливо меншому значенні струму, споживаного обмоткою (чи обмотками) вимірювального механізму. Зменшення цього струму дасть змогу зменшити об'єм, масу і вартість приладу.

У всіх вольтметрів (за винятком електростатичних) послідовно з обмотками вимірювального механізму (а у теплових — послідовно з розжарюваним дротом) ввімкнено додатковий опір, виконаний у вигляді котушок чи пластин з обмоткою з тонкого проводу, що має великий питомий електричний опір та малий температурний коефіцієнт опору (це манганін чи константан). Цей додатковий опір змонтовано всередині корпусу вольметра, поряд з вимірювальним механізмом, чи у частині об'єму корпусу, відокремленого від вимірювального механізму теплоізоляційною перегородкою для зменшення впливу тепла, що виділяється обмотками котушок чи пластин додаткового опору, на вимірювальний механізм.

Додаткові опори, які виконані на пластинах, мають сприятливі умови для охолодження, тому їхня обмотка може бути виконана дротом меншого діаметра, ніж обмотка котушкового додаткового опору. При цьому витрата дроту високого питомого опору буде значно меншою, ніж у котушкового додаткового опору. Це зменшує грошові витрати у виробництві таких опорів.

Але ізоляційні пластини, що разом з накладеною на них обмоткою підлягають термічній обробці при температурах, близьких до  $100^{\circ}\text{C}$ , часто розривають накладений на них з натягом дріт, через відмінні величини температурних коефіцієнтів лінійного розширення пластин і дроту. Через це котушкові додаткові опори слід визнати більш надійними і більш технологічними.

Стаціонарні вольтметри, які встановлюють на щитах і пультах управління, звичайно виготовляють кожний на одну певну величину номінальної напруги і градуують безпосередньо в одиницях напруги (у вольтах). Якщо стаціонарні вольтметри призначені для використання з вимірювальними трансформаторами напруги, то їх виконують на напругу повного відхилення 100В, але шкалу градуують згідно з напругою первинної обмотки вимірювального трансформатора напруги (частіш за все — у кіловольтах). При цьому на шкалі приладу обов'язково роблять напис, де вказують, з яким трансформатором напруги необхідно користуватися цим вольтметром.

Якщо стаціонарний вольтметр призначено для вимірів з окремим зовнішнім додатковим опором, його також градуують згідно з наявністю цього опору, а на шкалі робиться попереджувальний напис про вихідні дані цього додаткового опору.

#### **4. Магнітоелектричні омметри**

Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом побудовані за двома схемами: з послідовним і з паралельним вмиканням вимірювального опору  $R_x$  з вимірювальним механізмом (ВМ) приладу.

Омметри з магнітоелектричним вимірювальним механізмом виготовляються переносними з живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнятись від тієї, яка була при заводському градуюванні приладу. Тому перед кожним вимірюванням в омметрі з послідовною схемою при натиснутому перемикачі  $S$  потрібно встановлювати стрілочний покажчик на нульову позначку шкали зміною опору  $R_0$ , а в омметрі з паралельною схемою необхідно встановити стрілочний покажчик на нульову позначку шкали при невідключеному  $R_x$ . Це є недоліком омметрів з магнітоелектричним вимірювальним механізмом. Такого недоліку не мають омметри з логометричним вимірювальним механізмом. Наведена конструкція магнітоелектричного логометричного вимірювального механізму омметра. В магнітоелектричному логометричному вимірювальному механізмі в полі постійного магніту обертаються дві котушки, які жорстко скріплені між собою. Протидіючих пружинок в такому механізмі немає. Струм підводиться до котушок через тонкі стрічечки.



**ЛЕКЦІЯ 12**  
**ВИМІРЮВАЛЬНІ МОСТИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ КОМПЕНСАТОРИ**

1. Вимірювальні мости постійного струму
2. Мости змінного струму
3. Метрологічні характеристики мостів
4. Компенсатори постійного струму

## 1. Вимірювальні мости постійного струму

Мостові схеми застосовуються для вимірювання параметрів електричних кіл та для вимірювання неелектричних величин сумісно з параметричними вимірювальними перетворювачами.

**Мостове коло** – це електричне коло, в якому можна виділити два розгалуження опорів, значення між якими дорівнює нескінченності при відповідному співвідношенні параметрів елементів кола і скінченному значенню, якщо це співвідношення не виконується.

Засіб вимірювання, в основу якого покладене мостове коло, має назву **вимірювальний міст**. Принцип дії **вимірювальних компенсаторів** полягає у компенсації (проти-ставленні) двох спрямованих назустріч фізичних величин, одна з яких вимірювана, а інша – зразкова.

Мости постійного струму, що працюють у рівноважному режимі (надалі - рівноважні мости), належать до засобів вимірювання порівняння й призначені для вимірювання опорів. Цей міст називається *одинарним мостом* і призначений для вимірювання опорів від одиниць Ом до Ом. Для вимірювання малих опорів від до 50 Ом застосовується подвійний міст.

Розглянемо спочатку властивості одинарного моста. Вимірюваний опір включається в одне із плечей моста, і процес вимірювання полягає в тім, що зміною опорів, що стоїть в іншому плечі, наприклад, опорів, добиваються рівноваги моста, тобто такого стану, при якому в діагоналі моста ВР струм не йде. Для індикації цього стану в діагональ ВР, називану *вимірювальною діагоналлю*, включається високочутливий мікроамперметр, що виконує функцію нуль-індикатора (НІ). Ключ К призначений для короткочасного включення нуль-індикатора в діагональ, оскільки при значній відмінності від рівноваги тривале включення НІ може призвести до виходу його з ладу.

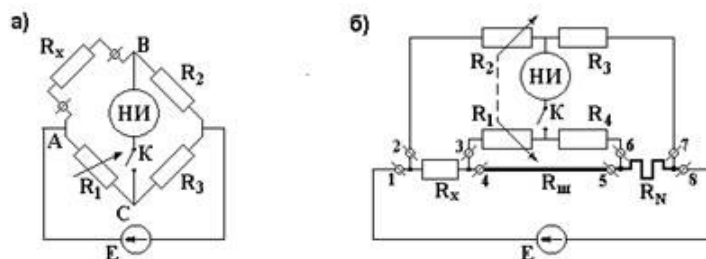


Рис. 40. Одинарный и двойной мосты постоянного тока

Рівновага моста наступить тоді, коли падіння напруг на плечах АВ й АС зрівняються.

$$E \frac{R_x}{R_2 + R_x} = E \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

де  $E$ - напруга живлення моста.

Із цієї рівності треба:

$$R_x (R_1 + R_3) = R_1 (R_2 + R_x)$$

звідки одержуємо умову відсутності струму у вимірювальній діагоналі, тобто умову рівноваги моста.

Значення опорів відоме, тому значення вимірюваного опору обчислюється по формулі

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}$$

$$R_2 / R_3 = 10^k R_2 / R_3 = 2^k$$

Звичайно в серійних мостах з ручним зрівноважуванням опору підбираються так, щоб відношення , де  $k$  - ціле число, позитивне, негативне або 0. Тим самим забезпечується зручність відлічування значення вимірюваного опору в десятковому коді по шкалі значень регульованого опору. У мостах з автоматичним зрівноважуванням під управлінням комп'ютера відношення .

Як виходить, умови рівноваги не залежать від напруги живлення моста. Але це не означає, що ця напруга може бути як завгодно малою, оскільки при зменшенні напруги живлення зменшується чутливість моста, тобто при обмеженій чутливості нуль-індикатора зростає невизначеність у визначенні стану рівноваги, а це, у свою чергу, приводить до зростанню адитивної погрішності результату вимірювань.

Тому з метою збільшення чутливості моста варто підвищувати напругу живлення. Однак, при цьому зростають струми, опори нагріваються цими струмами, і їхні значення змінюються, у результаті чого зростає погрішність вимірювань. Тому підвищувати напругу живлення можна тільки до рівня, при якому перегрів опорів плечей не приводить до росту погрішності, викликаній цим перегрівом. Крім того чутливість моста залежить від співвідношення опорів плечей. Максимальною чутливістю володіє рівноплечий міст, тобто міст, у якого значення опорів плечей однакові.

Істотні труднощі виникають при необхідності вимірювань малих опорів, значення яких становлять одиниці й долі Ом. Подібними опорами володіють потужні електричні двигуни й генератори, трансформатори й інші агрегати.

Ці труднощі викликані наступними обставинами:

- якщо вимірюваний опір становить десяті й соті долі Ом, то для того, щоб спадання напруги на плечі АВ моста досягло одиниць вольтів, необхідно пропустити через нього струм порядку десятків і сотень ампер відповідно, але при цьому опір також повинне бути малим, тому що в протилежному випадку на ньому буде виділятися неприпустимо велика потужність,
- для забезпечення прийнятної чутливості моста необхідно, щоб опори мали значення одного порядку зі значеннями опору ,
- погрішність регулювання й відлічування значень опору , рівного десятій і сотій долям Ом, неприпустимо велика через вплив нестабільного опору контактів і сполучних проводів, значення яких можуть навіть перевищувати значення вимірюваної напруги.

Тому для зазначеної мети одинарний міст непридатний, і для вимірювання малих опорів застосовується подвійний міст.

Великий струм, необхідний для створення значної напруги на вимірюваному опорі, пропускається по ланцюгу «1, 4, 5, 8». У цьому ланцюгу включений зразковий високоточний опір, значення якого порівнянне зі значенням вимірюваного опорів, і в нього включається вимірюваний опір. Ці два опори з'єднані товстою мідною шиною з мізерно малим опором. Контакти «1, 4, 5, 8» - струмові контакти опорів, контакти «2, 3, 6, 7» - потенційні контакти (затискачі). Про меті поділу контактів на струмові й потенційні.

При досягненні рівноваги моста:

$$R_x = R_N \frac{R_2}{R_3} - \frac{R_{III} R_4}{R_{III} + R_1 + R_4} \left( \frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3} \right)$$

Джерела погрешностей вимірювань, виконуваних рівноважними мостами:

- обмежена чутливість нуль-індикатора, породжує адитивну погрешність вимірювань,
- погрешності у виготовленні резисторів моста, у тому числі погрешність регульованого резистора, нестабільність контактів перемикачів регульованого резистора викликають мультиплікативну погрешність вимірювань.

Основна погрешність рівноважних мостів нормується, як відносна погрешність.

### **Мости постійного струму в нерівноважному режимі**

Мости постійного струму, що працюють у нерівноважному режимі, застосовуються, як вимірювальні перетворювачі опорів (або зросту опорів) у постійний струм або в напругу.

Принцип дії й призначення нерівноважних мостів розглянемо на двох прикладах мостів, опори плечей яких при рівновазі однакові. Будемо також вважати, що у вимірювальну діагональ включений великий опір навантаження (наприклад, опір вольтметра або вхідний опір підсилювача), істотно перевищуючий опори плечей моста:

У першому варіанті, опір, приріст якого необхідно перетворити у відповідну зміну напруги, включений в одне із плечей моста. Очевидно, що при  $\Delta R = 0$  міст урівноважений, і напруга в його вимірювальній діагоналі між точками 2 й 1 також дорівнює 0. При зміні цього опорів напруга у вимірювальній діагоналі буде змінюватися відповідно до функції перетворення:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23} - U_{13}(\Delta R) = \frac{E}{2} - \frac{E \cdot R}{R + R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{4R \left( 1 + \frac{\Delta R}{2R} \right)}$$

Позначимо відносний приріст опорів через  $\delta$ , тоді:

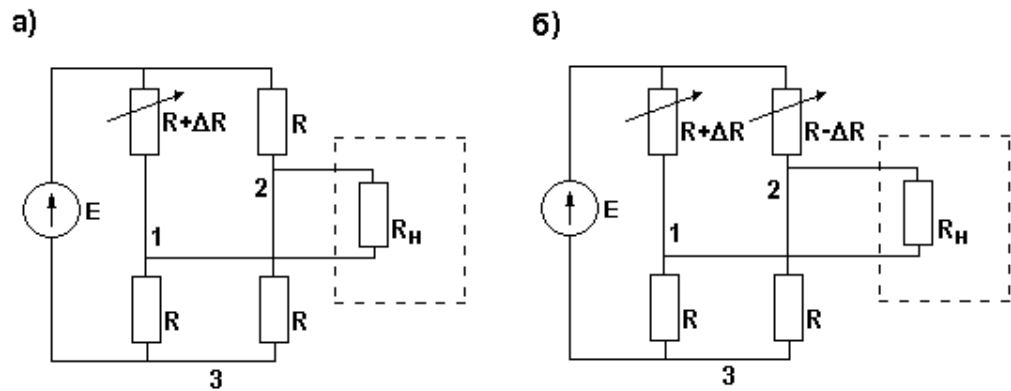


Рис. 41. Мости постійного тока в неравновесном режиме

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{4 \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$$

У ряді випадків може представитися можливість диференціального включення змінних опорів у різні плечі моста. При такому включенні чутливість такого перетворювача подвоюється, і функція перетворення має вигляд:

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23}(\Delta R) - U_{13}(\Delta R) = \frac{E \cdot R}{2R - \Delta R} - \frac{E \cdot R}{2R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{2R \left[1 - \left(\frac{\Delta R}{2R}\right)^2\right]}$$

Функція перетворення відносного приросту опору в напругу  $\varepsilon$ :

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{2 \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{4}\right)}$$

З виражень для функцій перетворення (49) і (50) видно, що:

- нерівновагий міст може застосовуватися як вимірювальний перетворювач приросту опору в напругу;
- у загальному випадку функція перетворення не є лінійною;
- погрішність перетворення породжується нестабільністю напруги живлення моста, а також погрішністю виготовлення й нестабільністю.

Для тензорезистивних мостів, функція перетворення яких лінійна, нормується відносна погрішність двочленною формулою. Якщо нелінійність нерівноважного моста проявляється значно, для них нормується приведена основна погрішність.

## 2. Мости змінного струму

Умови рівноваги мостів змінного струму. Мости змінного струму призначені для вимірювання комплексних опорів елементів електричних схем. Тому напруга живлення цих мостів - змінна, а плечі моста суть комплексні опори, як це показано на мал. а. На мал. б і в показані схеми мостів окремого

виду, призначені для вимірювання ємності конденсатора (мал. б) і індуктивності котушки (мал. в).

Умова рівноваги мостів змінного струму виводиться за аналогією з виводом умови рівноваги мостів постійного струму і в остаточному підсумку виражається рівністю, де - вимірюваний комплексний опір (імпеданс), - комплексні опори - плечі моста.

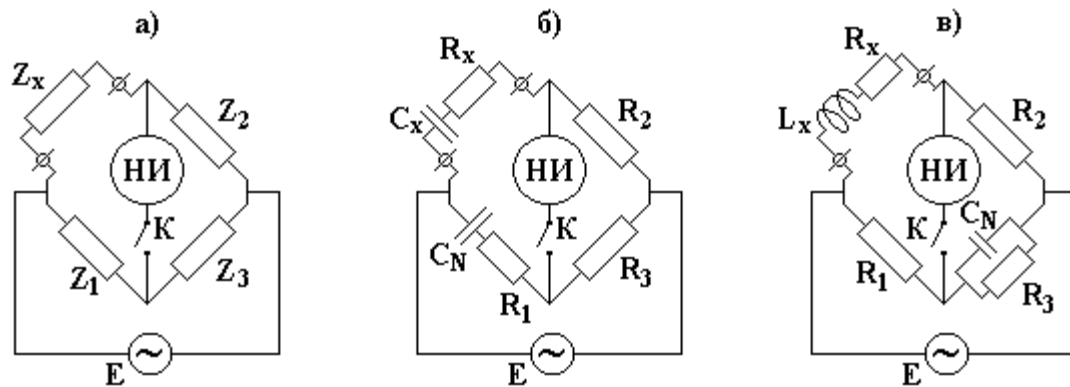


Рис. 42. Мости переменного тока

Застосовуючи експонентне представлення комплексних чисел, перепишемо цю умову у вигляді:

$$|Z_x| e^{j\varphi_x} \cdot |Z_3| e^{j\varphi_3} = |Z_1| e^{j\varphi_1} \cdot |Z_2| e^{j\varphi_2}$$

По ознаці рівності комплексних чисел, цій рівності відповідає система двох рівностей:

$$\begin{cases} |Z_x| \cdot |Z_3| = |Z_1| \cdot |Z_2| \\ \varphi_x + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 \end{cases}$$

Це означає, що врівноважувати міст змінного струму необхідно по двох компонентах: по модулю й фазі. Для контролю стану рівноваги моста необхідно застосовувати фазочутливий нуль-індикатор, що дозволяє фіксувати не тільки зміни амплітуди струму у вимірювальній діагоналі, так й інверсію фази цього струму, яка відбувається при переході через положення рівноваги.

**Міст змінного струму для вимірювання ємності конденсатора.** При вимірюванні ємності конденсатора необхідно мати у виді, що будь-який конденсатор не є ідеальним, його опір змінному струму є комплексним через втрати активної потужності, що виникає в силу недосконалості ізоляції, що знаходиться між пластинами. У зв'язку із цим, а також відповідно до загальної процедури підготовки й проведення вимірювань необхідно спочатку сформулювати математичну модель об'єкта вимірювань, у цьому випадку - конденсатора, як комплексного опору змінному струму.

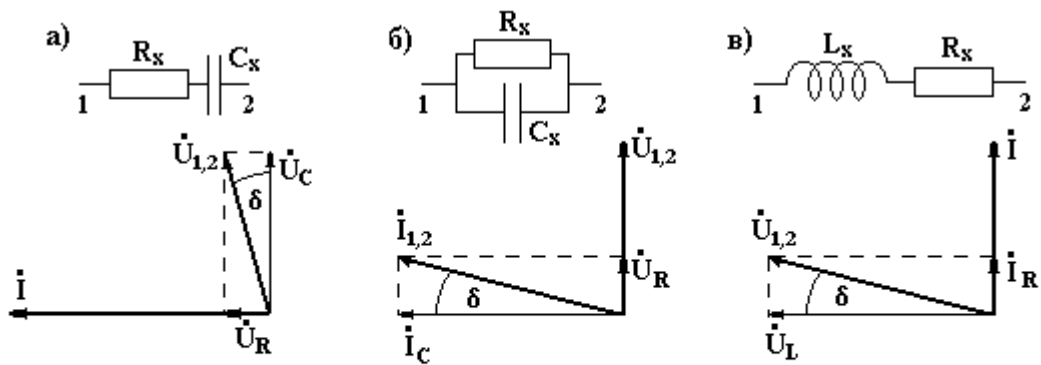


Рис. 43. Схеми заміщення реального конденсатора і індуктивності

Така математична модель в електротехніці називається схемою заміщення. Залежно від розміру втрат активної потужності на практиці використовується одна із двох схем заміщення: для конденсаторів з малими втратами - схема а, для конденсатора з більшими втратами - схема мал. б. Опір у цих схемах називається *опором втрат*. У різних схемах заміщення реального конденсатора опір втрат і навіть ємностей будуть розрізнятися. Як показник активних втрат конденсатора, що не залежить від схеми заміщення, використовується тангенс кута. Цей кут є відмінність зсуву по фазі між векторами струму й напруги, внесеного реальним конденсатором, від кута  $90^\circ$ .

Приклад схеми моста, призначеного для вимірювання параметрів схеми заміщення конденсатора з малими втратами, наведений на мал. б). У цій схемі в одне із плечей моста включений конденсатор, ємність якого відома з високою точністю, погрішність, з якою відома ємність, і втрати зневажливо малі.

Для виводу умов рівноваги моста скористаємося формулою:

$$\left( R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \cdot R_3 = \left( R_1 + \frac{1}{j\omega C_N} \right) \cdot R_2$$

звідки, по ознаці рівності комплексних чисел, виходить:

$$\frac{R_3}{C_x} = \frac{R_2}{C_N}$$

і, нарешті, при досягненні рівноваги результати вимірювань обчислюються по формулах

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3} C_x = C_N \frac{R_3}{R_2}$$

Привабливою властивістю такого моста є можливість його зрівноважування по обох складових за допомогою активних опорів. У якості одного з регульованих опорів треба, безперечно, вибрати, а в якості іншого. Джерела погрішностей вимірювань за допомогою рівноважних мостів змінного струму наведені нижче в наступному пункті.

Привабливою властивістю такого моста є можливість його зрівноважування по обох складових за допомогою активних опорів. У якості одного з регульованих опорів треба, безперечно, вибрати , а в якості іншого.

Джерела погрішностей вимірювань, виконуваних рівноважними мостами змінного струму:

- обмежена чутливість нуль-індикатора, породжує адитивну погрішність вимірювань;
- погрішності у виготовленні резисторів моста, у тому числі погрішність регульованого резистора, погрішність виготовлення конденсатора , відмінність від нуля його опору втрат, нестабільність контактів перемикачів регульованого резистора викликають мультиплікативну погрішність вимірювань.

### 3. Метрологічні характеристики мостів

Адитивна складова погрішності мостів, що працюють у рівноважному режимі, викликана дією тільки одного фактора, а саме, обмеженою чутливістю нуль - органа. Вплив цього фактора на загальну погрішність моста може бути зроблений зневажливо малим у порівнянні з погрішністю, породженою неточністю виготовлення резисторів й інших комплектуючих, тобто мультиплікативної складової погрішності. Тому нормованою характеристикою погрішності мостів є межа допущеної основної відносної погрішності.

В зв'язку з викладеними метрологічними характеристиками рівноважних мостів є:

- діапазон зміни вимірюваної величини,
- характеристика основної відносної погрішності,
- характеристики додаткових погрішностей.
- напруга живлення моста.

У тих випадках, коли

- напруга в діагоналі моста лінійно залежить від зміни параметрів цього моста,
- коли до складу подібного моста включений лінійний підсилювач сигналу вимірювальної діагоналі,
- і цей підсилювач володіє власною адитивною і мультиплікативною погрішністю, тоді характеристика основної відносної погрішності нормується двочленною форм:

$$\gamma \leq c + d \left( \left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \%$$

У таких випадках клас точності подібного складеного засобу вимірювань позначається через коефіцієнти двочленної формули  $c/d$ .

Нерівноважні мости являють собою, по суті справи, вимірювальні перетворювачі. Їхній вихідний сигнал  $y$ , стало бути, погрішність залежить не тільки від зміни вимірюваної величини  $x$  від погрішності виготовлення опорів плечей моста, але й від напруги живлення. У чинність нелінійності функції



перетворення більшості мостів, що працюють у нерівноважному режимі при великих змінах опору, для них нормується основна приведена погрішність. Виключення становлять нерівноважні мости, плечі яких утворюють тензорезистори. Відносна зміна опору тензорезисторів невелика, і такі мости можуть уважатися лінійними з великим ступенем точності.

#### 4. Компенсатори постійного струму

За допомогою компенсаторів постійного струму реалізується метод зрівноваження.

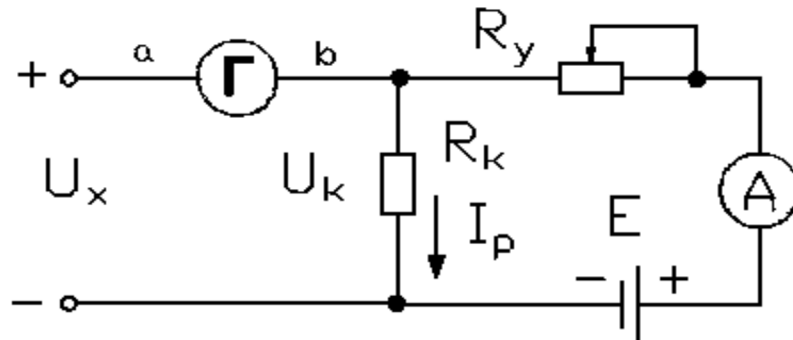


Рисунок 5. Схема компенсації напруги зміною робочого струму

Вимірювана напруга  $U_x$  компенсується відомою напругою  $U_k$ , що одержується у вигляді спаду напруги певного робочого струму  $I_p$  на резисторі  $R_k$ , значення якого відоме з необхідною точністю. Змінюючи робочий струм  $I_p$  змінним резистором  $R_y$ , домагаються рівності вимірюваної напруги  $U_x$  і  $U_k$  – напруги компенсування. Момент рівноваги характеризується нульовими показаннями гальванометра  $\Gamma$ .

Напругу компенсування  $U_k = I_p R_k$  можна змінювати також, змінюючи опір резистора  $R_k$  при незмінному робочому струмі. Момент компенсації характеризується нульовими показаннями гальванометра  $\Gamma$ .

Широко застосований метод зрівноваження реалізується за допомогою мостових і компенсаційних схем. Компенсатори можуть бути постійного та змінного струму. Схема компенсатора постійного струму, у якому поєднуються дві вищерозглянуті схеми компенсації. Компенсатор використовують для точного вимірювання напруги до 1,2 В. Для вимірювання більших напруг використовують зразкові подільники напруги. Шляхом непрямих вимірювань можливо виміряти струм, опір та потужність.

Основними елементами схеми компенсатора є:

$\Gamma$  - гальванометр;

$\Pi$  - перемикач, що має три положення.

”НЕ” (нормальний елемент),

“Х” - вимірювана напруга та середнє (нейтральне) положення;

ЗБ - зовнішня батарея;

$R_{рс}$  - змінний резистор для встановлення робочого струму;

$R$  - магазин опорів;

$R_0$  - зразковий опір;

$E_H$  - нормальний елемент - джерело ЕРС, значення якої відоме з точністю до п'ятого знаку після коми. Значення ЕРС  $E_{20}$  при температурі  $20^\circ\text{C}$  вказано в паспорті.

Для того, щоб робочий струм не змінювався при зміні ЕРС "HE", зумовленої відхиленням температури, необхідно змінювати опір зразкового резистора  $R_0$ . Для цієї цілі використовують змінний резистор  $R_t$ , тобто  $R_t$  служить для введення поправки в зразковий опір при відхиленні температури від нормальної.

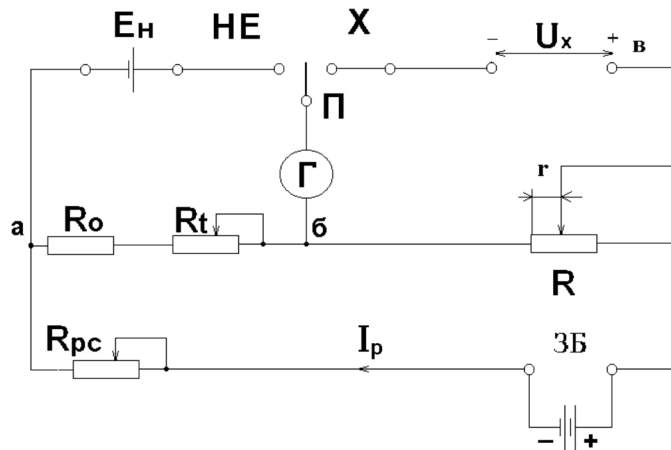


Рисунок 6. Схема компенсатора

Проведення вимірювань складається з двох етапів. По-перше, встановлюється певне значення робочого струму  $I_p$ . Для цього перемикач  $\Pi$  встановлюють в положення "HE" і, змінюючи величину змінного резистора  $R_{pc}$ , досягають нульового показання гальванометра. У цьому випадку:

$$E_t = U_{a\text{ б}} = I_p (R_0 + R_t).$$

Робочий струм в процесі наступних вимірювань не змінюється. У цьому випадку відбувається компенсація ЕРС нормального елемента спадом напруги на резисторах  $R_0$  та  $R_t$  шляхом зміни робочого струму у відповідності зі схемою. По-друге, після встановлення робочого струму переходять безпосередньо до вимірювання  $U_x$ . Для цього перемикач  $\Pi$  встановлюють в положення "X" і, змінюючи опір резистора  $R$ , досягають нульових показань гальванометра. У цьому випадку  $U_x$  дорівнює різниці потенціалів між точками б та в.

У цьому випадку відбувається компенсація вимірюваної напруги спадом напруги на резисторі  $R$  шляхом зміни цього опору у відповідності зі схемою.

Висока точність вимірювань зумовлена тим, що  $E_H$  і зразковий опір відомі з високою точністю. Точність компенсації залежить від чутливості гальванометра, яка зазвичай досить велика. Оскільки робочий струм при цьому величина постійна, то напруга  $U_{ab}$  прямо пропорційна  $r$ , що дає змогу відградувати магазин опорів не в омах, а у вольтах.

### ЛЕКЦІЯ 13

## ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

1. Цифрові вимірювальні прилади, загальні положення
2. Цифровий частотомір середніх значень
3. Цифровий фазометр миттєвих значень
4. Цифровий вольтметр часового-імпульсного перетворення

### **1. Цифрові вимірювальні прилади, загальні положення**

**Цифрові вимірювальні прилади** це такі пристрої, в яких чисельне значення вимірюваної величини відображається як ряд значень представлених в тій чи іншій формі.

Слід зазначити, що у цифрових вимірювальних приладах можна вручну керувати процесом вимірювання (у разі пасивного вимірювання параметрів електричних ланцюгів, які називається вимірювальними мостами і у випадку активного вимірювання параметрів - компенсатори) і автоматично. Однак, в даний час, під цифровими вимірювальними приладами зазвичай розуміють цифровий пристрій, в якому процес вимірів здійснюється автоматично.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) зазвичай мають більш складну структуру, ніж аналогові і можуть складатися з декількох відносно автономних вузлів. Наприклад, вони, можуть, складатись з декілька попередніх входних блоків, які як правило включають в себе пристрій автоматичного вибору межі виміру, засобів автоматичного вибору та визначення полярності вимірюваної величини, пристрою корекції систематичної похибки, пристрою захисту від перевантаження і т. д. Крім того, ЦВП часто включають в себе блоки аналогових перетворювачів, метою якої є трансформація входною вимірюваної величини в іншу, аналогове, числове значення якого є більш ефективно (наприклад, з більшою швидкістю визначення, з меншою споживчою потужністю, більш дешевшим способом.

В якості аналогових величин, які безпосередньо піддаються процесу отримання його числового значення, в ЦВП більшість часто використовують часовий інтервал, частоту або кількість імпульсів, а також постійні напругу (струм). Також необхідно звернуту увагу, що в деяких випадках це є простішим і зручнішим отриманням числових значень лінійних переміщень або кута обертання.

Перевага використання для безпосереднього вимірювання часового інтервалу є простота отримання точної одиниці (міри) порівняння у вигляді періоду повторення імпульсів генератору з кварцованою частотою стабілізації.

Перетворення вимірюваної величини в частоту або число імпульсів дозволяє дуже просто потримати числові значення звичайним підрахунком числа імпульсів за зразковий інтервал часу, який також легко реалізується за допомогою імпульсів, які стабілізуються кварцовим генератором. А використання постійною напруги (струму) в якості величини, яка піддається безпосередньо операції отримання її числового значення, дає можливість реалізації максимальної продуктивності.

В сучасних ЦВП процес порівняння вимірюваного значення з мірами і отримання її числового значення повністю автоматизований, блок ЦВП, що реалізує цей процес, отримав назву аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Отримання цифрового еквіваленту аналогового значення може бути здійснено тільки в результаті дискретизації (квантування) цього значення на рівні, яке визначає так звану похибку квантування. Часто її вважають, специфічною методичною похибкою, характерною для цифрових вимірювальних приладів.

Похибка квантування є випадковою величиною, яка рівномірно розподіляється по в діапазоні від  $-q/2$  до  $+q/2$ , де  $q$  є кроком квантування що дорівнює величині молодшому розряду значення результату. Як правило інструментальна похибка цифрового пристрою не повинна перевищувати його похибку квантування.

При вимірюванні процесів, тобто значення, які змінюються під впливом часу, надзвичайно важливим є прив'язати його результативне значення до моменту часу виміру. Визначення цих моментів часу називається дискретизації величини вимірюваної в часі і похибка у її визначенні, наслідком якої є вплив на подальшу обробку цих значень, підвищення точності кінцевого результату.

Таким чином, при практичному використанні цифрових вимірювальних приладів важливо розрізняти похибку квантування, яка визначається дискретністю по рівню значення вимірюваної величини, яка відноситься до похибки статичної, тобто похибки, яка виникає при виміру величин, які не змінюються за часом при вимірюванні і похибки динамічної, яка додатково відбувається за рахунок зміни значення вимірюваної величини за час одного виміру. Перша визначається тільки властивістю вимірювального приладу себе тільки, а третя – ще і характеристикою вимірюваного сигналу.

Основними характеристиками цифрових вимірювальних приладів є:

- інструментальна статична похибка, яка нормується двочленною формулою;

- похибка квантування, яка задається числом розрядів пристрою який відраховує значення виміру;

- швидко чинність;

- ліміт вимірювання;

- вхідний опір;

- споживча потужність;

- апертурний час, який характеризує тимчасове не визначення прив'язування звіту при вимірюванні різних види процесів.

Добуток апертурного часу на похідну вимірюваного сигналу у відправній точці підрахунку визначає максимальну динамічну похибку вимірювання. Для зменшення динамічної похибки у блоці пристроїв вводу цифрових вимірювальних приладів часто включають так званий пристрій вибірки та зберігання (ПВЗ), який є по суті аналоговим ЗП, який запам'ятовує миттєві значення сигналу виміру у фіксованих точках в часі одного виміру.

Для цифрових вимірювальних приладів, призначених для вимірювання параметрів пасивних електричних величин (опору, ємності, вимірювань індуктивностей т. д.) вхідний опір немає сенсу, так як значення вимірюваної величини не є джерелом електричної енергії, а навпаки, його споживачем.

Саме джерелом енергії є вимірювальний прилад. Для вимірювальних приладів цього виду вказується і нормується значення величини електричного струму або напруги, які з'являються на вимірюваних пасивній електричній величині під час вимірювання. Знання про ці значення дуже важливо, оскільки вони можуть впливати на вимірювані параметри, а іноді може призвести до незворотних змін.

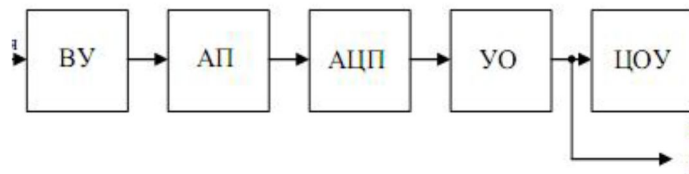


Рисунок 1. Узагальнена структурна схема цифрових вимірювальних приладів

де: ВУ – блок пристрій вводу, до якого входять пристрій вибору межі виміру, пристрій визначення та вибір полярності значення вимірювання, пристрій збільшення вхідного опору цифрового пристрою та його завадостійкості тощо.

АП – блок аналогового перетворення, в якому відбувається конвертування аналогового сигналу в аналоговий сигнал іншого виду, найзручніший процес для отримання числових значень вимірюваної величини. У практичному використанні АП, у більшості випадків вхідний сигнал перетворюється в напругу постійного струму, часового інтервалу проміжок часу, а також частоту або число електричних імпульсів.

АЦП – блок аналого-цифрового перетворення, в якому виконуються основні вимірювальні операції – дискредитація часу, квантування по рівню і кодування рівня аналогової величини яка вимірюється в тій чи іншій системі урахування.

УО – устрій обробки, в якому може відбуватися проста попередня обробка вимірювання результатів, наприклад:

- обчислення частоти по вимірюваному періоду у частотомірах низьких і інфранизьких частот;
- обчислення середнього значення зрушення фаз в цифрових фазометрах;
- обчислення середнього значення результатів серій вимірювань, яке дає можливість зменшити випадкову компоненту похибок вимірювань;
- здійснення цифрового методу корекції дрейфу параметрів вимірювального приладу з метою зменшення систематичної похибки вимірювання.

ЦОУ – блок устрій цифровою обробки, зазвичай включає в себе рідкокристалічні, газорозрядні або світлодіодні індикатори, схеми управління цими індикаторами, а також перетворювачі кодів чисел з системи числення, в

якій безпосередньо отримується числовий еквівалент величини що вимірюється у код числа, який необхідний правильній роботі індикатора що використовується.

Як правило, у всіх сучасних цифрових вимірювальних приладах передбачається виведення результатів вимірювання на реєструючі пристрої того чи іншого типу, або безпосередньо до комп'ютера. Також відзначимо, що блок АЦП присутній в будь-якому типі цифрового пристрою вимірювання, на відміну від усіх інших блоків, присутність яких обумовлена конкретним типом пристрою.

Існують дві області цифрових вимірювальних приладів. Перша область – використання їх в якості пристроїв вводу в вимірювально-обчислювальних комплексів (віртуальних вимірювальних приладах, SCADA – системах (Supervisory for Control And Data Acquisition – диспетчерське управління та збір даних), а друга – використання їх в якості автономних цифрових вимірювальних приладів в лабораторії або виробництві.

У першому випадку результат вимірювання використовуються технічними пристроями для автоматичної обробки інформації, у другому – результат вимірювання призначений для безпосереднього людського розуміння. Ці обставини призвели до деяких відмінностей між цифровими пристроями, які розробляються для цих двох областей застосування, а саме:

- В цифрових вимірювальних приладах, призначених для безпосереднього використання людиною, числові значення вимірюваної величини формується або безпосередньо у десяткову або двійкову систему відліку для спрощення послідового перетворення в десяткову систему, найзручніший для людини. У цифрових вимірювальних приладах, які використовуються в різних роду автоматизованих системах збору та обробки даних, формування числового значення вимірюваної величини відбувається в двійковій системі, придатній для подальшої комп'ютерної обробки.

- Цифрові вимірювальні прилади, призначені для роботи з людиною не потребує великої швидкої дії, тому що людина не здатна поглинати інформацію більше 10 біт/с. В той же час для цифрових вимірювальних приладів, призначених для роботи в системах з подальшою автоматичною обробкою вимірювальної інформації, швидкість її обробки є одна з найбільш важливих експлуатаційних характеристик.

- Цифрові вимірювальні прилади призначені для роботи безпосередньо з людиною, обов'язково повинні мати відлікові пристрої, які показують отриманий результат вимірювання у десятковій системі відліку. Цифрові вимірювальні прилади, які працюють в системах з подальшою обробкою, або не мають звітних пристроїв, або мають його в якості допоміжного вузла, що використовується при налаштуванні системи або її ремонту, при чому із індикація здійснюється у двійковій нотації.

Ці особливості приводять до того, що деякі методи аналого-цифрового перетворення, стають більш переважні при використанні цифрових вимірювальних пристроїв іншій сфері.

Звідси випливає з усього вище перерахованого, основним блоком цифрового вимірювального пристрою є блок аналого-цифрового перетворення (АЦП), в якому чиниться формування числового еквіваленту вимірюваної величини.

Завдяки блокам великомасштабного перетворення вимірювана та зразкова величина можуть брати участь у процесі порівняння, отже, формування числового значення вимірюваної величини, як безпосередньо, так і у вигляді дрібних (або кратних) значень. Послідовність формування цих дрібних (або кратних) значень цих величин і порівняння їх між собою визначає алгоритм проведення процесу виміру.

## 2. Цифровий частотомір середніх значень

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень оснований на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий часовий інтервал часу  $t_0$ . Частота  $f$  періодичного сигналу - це фізична величина, значення якої визначають як кількість коливань в одиницю часу.

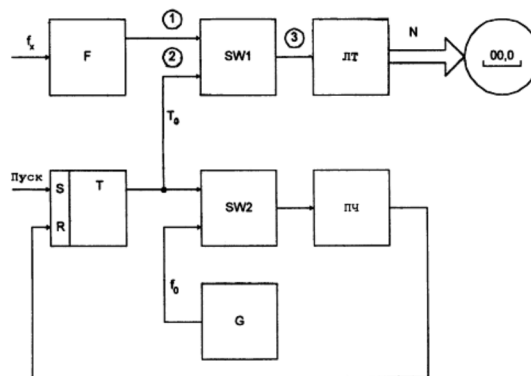


Рисунок 2. Структурна схема частотоміра середніх значень

Структурна схема частотоміра містить такі основні блоки:

RS – тригер, SW2 – схема збігу;

G – генератор стабільної частоти;

ПЧ – подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал  $T_0$ .

Лічильник ЛТ, який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий інтервал часу  $t_0$ ; схему збігу SW1, де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти. Формувач імпульсів F, який із входних сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю.

За командою «Пуск» тригер T встановлюється у стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу SW1 і SW2. Імпульси, які слідують із частотою  $f_x$  через формувач F і відкриту схему збігу SW1, надходять на вхід двійкового лічильника ЛТ, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему збігу SW2 імпульси  $f_0$  з виходу генератора G стабільної частоти надходять на вхід подільника частоти ПЧ, коефіцієнт розділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу  $t_0$ .

Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу  $t_0$  тригер  $T$  встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу  $SW1$  і  $SW2$  закриваються і в лічильнику  $ЛТ$  фіксується код  $N$ . Кількість імпульсів невідомої частоти, які підраховує двійковий лічильник за час  $t_0$  визначається:

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x,$$

де  $t_1, t_2$  - моменти часу початку та закінчення зразкового часового інтервалу.

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти і визначається  $t_0 = k T_0$ , де  $k$  - коефіцієнт ділення подільника частоти;  $T_0$  - період імпульсів зразкової частоти  $f_0$ .

### 3. Цифровий фазометр миттєвих значень

Принцип дії цифрових фазометрів оснований на перетворенні різниці фаз двох електричних сигналів однакової частоти у часовий інтервал  $t_x$  із наступним його квантуванням імпульсами опорної частоти  $f_0$ .

Основними елементами фазометра є два формувача  $F1$  і  $F2$ , RS-тригери, схема збігу  $SW$ , генератор  $G$ , двійковий лічильник  $ЛТ$  і цифровий пристрій - показчик. Перетворення різниці фаз двох електричних сигналів  $U1$  і  $U2$  з частотою  $f_x$  у часовий інтервал  $t_x$  здійснюють відповідні формувачі  $F1$ ,  $F2$  і RS-тригер.

Квантування часового інтервалу  $t_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$  відбувається за допомогою схеми збігу  $SW$ .

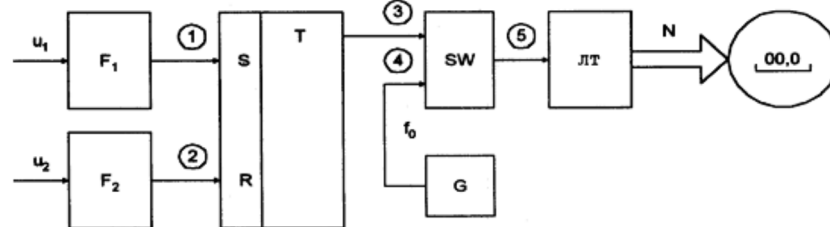


Рисунок 3. Структурна схема цифрового фазометра миттєвих значень

### 4. Цифровий вольтметр часового-імпульсного перетворення

Принцип дії оснований на перетворенні вимірюваної напруги  $U_x$  в часовий інтервал  $t_x$ , з наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти  $f_0$ .

Основним елементом структури вольтметра є перетворювач вимірюваної напруги  $U_x$  у часовий інтервал  $T_x$ , що реалізований на двох компараторах  $ПП1$  і  $ПП2$ , генераторі напруги, що лінійно змінюється,  $G1$  і RS-тригері  $T$ .

Квантування часового інтервалу  $T_x$  імпульсами опорної частоти  $f_0$ , сформованими на виході генератора  $G2$ , здійснюється в схемі збігу  $SW$ . Двійковий лічильник  $ЛТ$  підраховує кількість імпульсів  $f_0$  за час  $T_x$ . Результат вимірювання відображається на цифровому індикаторі.



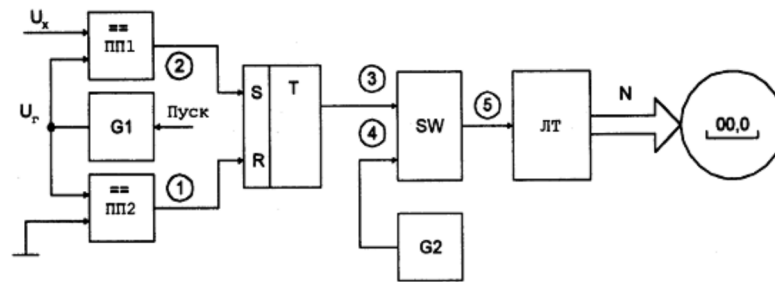


Рисунок 4. Структурна схема цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення

У момент часу  $t_0$  сигналом «Пуск» запускається генератор напруги  $G_1$ , що лінійно змінюється, виробляє сигнал  $U_r$ , який подається на входи компараторів ПП1 і ПП2, що по черзі спрацьовують у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ .

При переході напруги  $U_r$  через рівень нуля (момент часу  $t_1$ ) спрацьовує компаратор ПП2 і на його виході формується імпульс «Старт», що по S- входу встановлює в одиничний стан тригер Т. Рівнем логічної одиниці відкривається

схема збігу SW і імпульси опорної частоти  $f_0$  з виходу генератора  $G_2$  надходять на вхід лічильника ЛТ. Напруга  $U_r$  на виході генератора  $G_1$  зростає, поки не стане рівною  $U_x$ .

Момент рівності  $U_r = U_x$  в момент часу  $t_2$  фіксує компаратор ПП1 шляхом формування на своєму виході сигналу «Стоп».

Сигналом «Стоп» по R - входу компаратор встановлює тригер Т в нульовий стан і закриває схему збігу SW. На цьому процес вимірювання  $U_x$  закінчується.

Таким чином, на виході тригера Т формується часовий інтервал  $T_x$ , пропорційний вимірюваній напрузі  $U_x$ , під час якого формується одиничний імпульс, що відкриває схему збігу SW, і імпульси опорної частоти  $f_0$  із виходу  $G_2$  надходять на вхід лічильника. Кількість імпульсів з частотою  $f_0$ , що надходять на лічильник ЛТ за час  $T_x$ , визначається

$$N_B = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0.$$

Оскільки  $T_x = k U_x$  ( $k$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від крутості напруги, що лінійно змінюється), то рівняння перетворення  $N_B = F(U_x)$  цифрового вольтметра набуває вигляду

$$N_B = k U_x f$$

Залежність похибки квантування від вимірюваної напруги та крутості лінійно-змінюваної напруги.

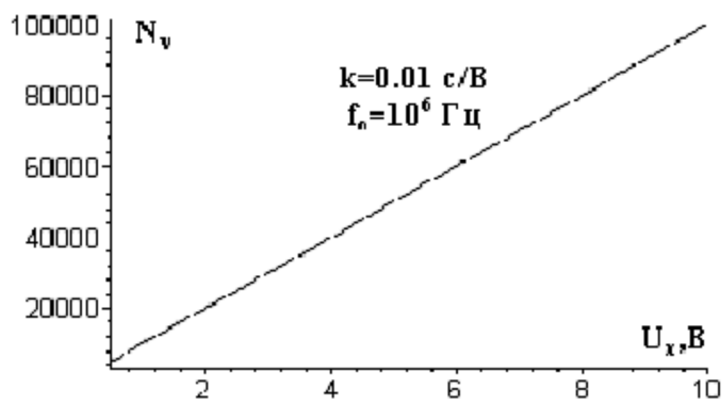


Рисунок 5. Статична характеристика цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення

Крім того, похибка таких засобів вимірювань в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно змінюваної напруги, нестабільністю порога чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора.

Суттєвим недоліком цифрового вольтметра часового-імпульсного перетворення є низька завадостійкість. Для підвищення завадостійкості застосовують аналогове та цифрове інтегрування.

## ЛЕКЦІЯ 14 ОСЦИЛОГРАФИ

1. Електронні осцилографи
2. Аналогові осцилографи
3. Цифрові осцилографи

### 1. Електронні осцилографи

Осцилограф (лат. *oscillo* – гойдаюся і *graph* – пишу) – контрольно-вимірювальний прилад для дослідження і візуалізації електричних сигналів, а також визначення їх параметрів в реальному часі. Осцилограф, дозволяє проводити візуальний контроль таких характеристик, як форма, період, амплітуда, полярність або тривалість сигналу.

Електронно-променеві (електронні) осцилографи призначені для:

- візуального спостереження,
- вимірювання,
- реєстрації електричних сигналів.

Можливість спостереження сигналів, що змінюються в часі, робить осцилографи унікальними приладами при дослідженні різних параметрів досліджуваних сигналів. Осцилографи можна вважати одними з найбільш поширених контрольно-вимірювальних приладів в багатьох технічних галузях виробництва і наукових досліджень.

Класифікація осцилографів можлива по декількох параметрах, наприклад:

1. за способом обробки вхідного сигналу, вони діляться на:
  - аналогові,
  - цифрові;
2. по частотному діапазону на:
  - низькочастотні,
  - універсальні (імпульсні),
  - високочастотні
3. по кількості променів на:
  - однопроменеві,
  - двопроменеві і так далі.

N-променевий осцилограф має N сигнальних входів і може одночасно відображати на екрані N графіків.

Цифрові осцилографи у свою чергу діляться на:

- що запам'ятовують,
- люмінофорні,
- стробоскопічні.

Електронним осцилографом, називається електронний пристрій який дозволяє спостерігати на екрані графік зміни напруги, яка подається а його вертикально-відхиляючий вхід. Напруга яка подається на горизонтально - відхиляючий вхід розгортає по ширині. Оскільки в переважній більшості випадків, слід відстежити зміну вхідної напруги в часі, то напруга що розгортається, формується лінійним збільшенням в часі, тобто пилкоподібною формою.

Здібність візуалізувати сигнали є надзвичайно важливою якістю осцилографа, що дозволяє оперативно проводити контроль і діагностику електричних ланцюгів. Крім того, сучасні осцилографи дозволяють отримати графіки сигналів дуже точно з витриманим масштабом на осях координат, що дозволяє визначити в різні моменти часу період, частоту і зсув сигналу по фазі.

Таким чином, сучасний осцилограф, є універсальним вимірювальним приладом.

Останнім часом розроблені і використовуються різні види електронних осцилографів а саме: універсальні, швидкісні, запам'ятовуючі і спеціальні осцилографи.

Найбільш поширені універсальні осцилографи, що дозволяють досліджувати різноманітність електричних сигналів з тривалістю від одиниць наносекунд до декількох секунд в діапазоні від частки мили вольт до сотен вольт.

Смуга кращих універсальних осцилографів становить 300 400 МГц. Часто універсальні осцилографи виготовляються із змінними блоками, що дозволяє розширюючи їх функціональність.

Для дослідження процесів дуже швидкісних процесів (нано- та піко секундної тривалістю) призначені високошвидкісний осцилографи, в яких використовують спеціальні електронно-променева трубка з бігучою хвилію.

Запам'ятовуючі осцилографи, мають спеціальні електронно-променеві трубки, які мають здатність зберігати та відтворювати зображення сигналу протягом тривалого часу після зникнення його на вході. Основне призначення запам'ятовуючого осцилографу – дослідження разових і рідко повторюваних процесів.

Спеціальні осцилографи оснащені додаткові блоки цільового призначення.

До них відносяться цифрові осцилографи, які дозволяють не тільки спостерігати сигнал, але і передати його у цифровому виді до комп'ютера для подальшої обробки. Спеціальні осцилографи поставляється з блоками, вимірювання напруги, струму і опорів (мультиметрами), а також пристроями для досліджень вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів. За кількістю одночасно спостережуваних, на екрані сигналів відрізняють одно- і багатоканальні осцилографи. Суміщення на екрані зображення кількох

вхідних сигналів реалізується за рахунок використання спеціальних багатопробних трубок, або через періодичне перемикання осцилографа на різні входи за допомогою електронного комутатора.

## 2. Аналогові осцилографи

Прилади цього типу вважаються класичними представниками загального поняття про осцилограф як контрольно-вимірювальний прилад. У загальному випадку, будь-який аналоговий осцилограф складається з наступних функціональних складових: вхідний дільник напруги ВПН, підсилювач вертикального відхилення ПВВ, схема синхронізації СС, підсилювач горизонтального відхилення ПГВ, джерело живлення (на схемі не показано) і електронно-променева трубка ЕПТ.

У осцилографах застосовують електронно-променеві трубки з електростатичним відхиленням, на відміну від телевізорів і моніторів, де використовується магнітне відхилення. Електронно-променеві трубки з електростатичним відхиленням, хоча і складніші у виготовленні, мають набагато більший частотний діапазон.

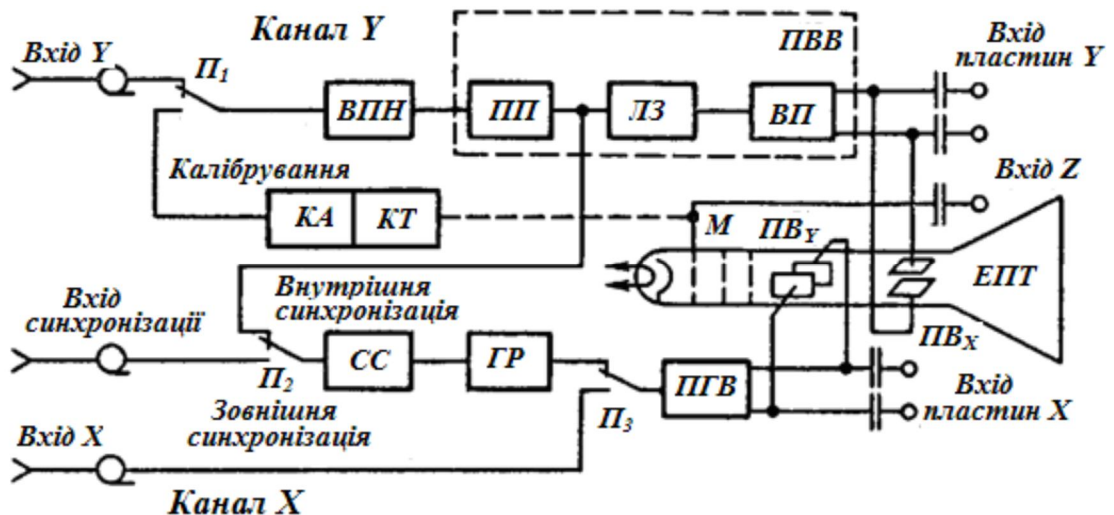


Рис 1. Структурна схема аналогового осцилографу

Блок допоміжних пристроїв включає калібратор амплітуди КА і калібратор тривалість КТ, що використовуються при вимірюваннях амплітудних і часових параметрів досліджуваних сигналів. Підключення КА на час калібрування чутливості каналу Y проводиться за допомогою перемикача П1. При визначенні масштабу осцилограми по осі часу КТ управляє яскравістю променя з допомогою дії на електронну гармату трубки.

Чутливість електронно-променевих трубок порівняно невелика, тому необхідний підсилювач у каналі Y. Основні вимоги, що пред'являються до підсилювача:

а) мінімум амплітудних і фазових спотворень в можливо ширшому діапазоні частот: це означає, що коефіцієнт посилення підсилювача при зміні частоти в широкіх межах не повинен значно відхилятися від свого

номінального значення, а фазове зрушення, що створюється підсилувачем, повинне змінюватися пропорційно частоті;

б) лінійна залежність між вихідною і вхідною напругою при зміні останньої в заданих межах;

в) високий вхідний опір.

При дотриманні цих умов можна достатньо точно відтворити на екрані осцилографа криву вхідної напруги і досліджувати той або інший процес без помітного споживання потужності від джерела досліджуваних сигналів.

Для низькочастотних осцилографів смуга частот, що пропускаються підсилувачем, лежить в межах від одиниць герц до 1– 5,5 МГц. У осцилографах, призначених для дослідження сигналів в широкому діапазоні частот і для імпульсних вимірювань, застосовуються підсилувачі з верхньою межею смуги пропускання приблизно 50 МГц. Вхідний опір підсилувачів дорівнює 1–50 МОм, вхідна ємність 30–40 пФ.

**Істотним недоліком** звичайних електронних осцилографів є неможливість одночасного спостереження декількох процесів. Цей недолік усувається застосуванням багатопроменевих трубок, які мають не одну, а декілька систем фокусуєчих і відхиляючих електродів.

### 3. Цифрові осцилографи

Останнім часом цифрові осцилографи, які мають великий ряд переваг, витісняють аналогові прилади зі світового ринку, але все-таки традиційні аналогові осцилографи реального часу не зникають повністю, насамперед із-за низької вартості порівняно з цифровими осцилографами. Плюс до цього з розвитком елементної бази аналогові осцилографи придбали ряд важливих додаткових функцій і можливостей, наприклад, курсори з цифровим відліком величин (напруги і часу), що надзвичайно полегшують роботу, і дуже зручне цифрове управління. За допомогою вхідного мультиплексора для декількох каналів можна досить просто організувати єдину розгортку на однолучевій трубці з відображенням декількох сигналів.

Основна відмінність в тому, що досліджувані безперервні сигнали ще на вході осцилографа, за допомогою спеціальних аналого-цифрових перетворювачів перетворюються у цифрову форму, тобто представлені як послідовність числових кодів. Таким чином, завдяки подальшій обробці в самому осцилографі цієї цифрової інформації за допомогою мікропроцесорної техніки, можна отримати значення широкого спектру параметрів досліджуваного сигналу з високою точністю. І, як наслідок, на екрані осцилограф, можна відображати не тільки сам процес дослідження і, водночас числові параметри, але, і його спектральний склад та автокореляційну функцію. Однак, треба відмітити, що швидко розвиваються в наш час так звані віртуальні пристрої створюють серйозну конкуренцію з ними.

В порівнянні з аналоговими попередниками вони мають ширші можливості, а завдяки зниженню вартості цифрових схем з кожним роком вони стають доступнішими потенційним покупцям. У загальному вигляді цифровий осцилограф складається з вхідного дільника, нормалізуючого підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, блоку пам'яті, пристрою управління пристрою відображення. Пристрій відображення зазвичай виконується на основі рідкокристалічної панелі (див. рис.2).

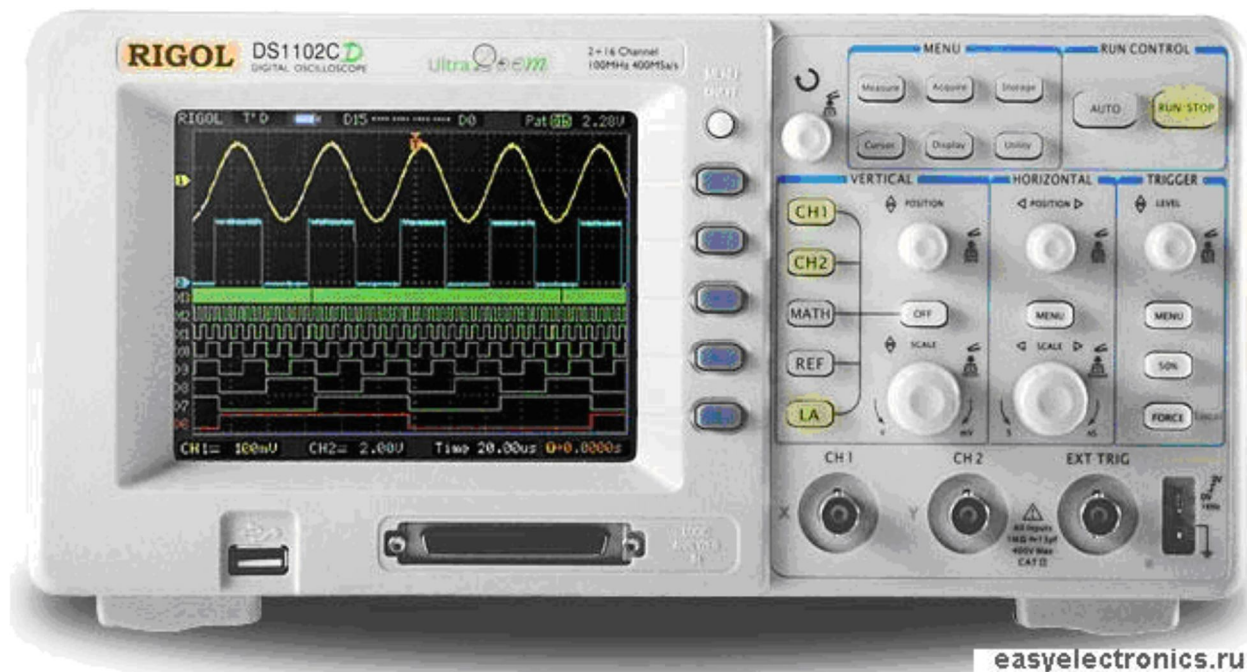


Рисунок 2. Цифровий осцилограф

Цифрові осцилографи мають більш широкі можливості за рахунок самого принципу роботи. Вхідний сигнал після нормалізації перетворюється в цифрову форму і записується в пам'ять. Швидкість запису (кількість вибірок у секунду) задається пристроєм управління, і її верхня межа визначається швидкодією аналого-цифрового перетворювача, а нижня межа теоретично не обмежена, на відміну від аналогових осцилографів. Повне оцифрування сигналу дозволяє уникнути відображення сигналу в реальному масштабі часу і, отже, підвищити стійкість зображення, організувати збереження результатів, спростити масштабування і розтяжку, ввести мітки. Використання дисплея замість осцилографічної трубки відкриває можливість для відображення будь-якої додаткової інформації і управління приладом за допомогою меню.

Характеристики сучасних цифрових осцилографів:

- висока чутливість (від 1 мВ/дел) і дозвільна спроможність (від 8 до 14 біт);
- широкий діапазон коефіцієнтів розгортки (від 2 нс до 50 с);
- розтяжка сигналу за часом або по амплітуді в широких межах;
- розвинена логіка синхронізації з будь-якими затримками запуску розгортки.

Окрім звичайних схем запуску синхронізації запуск може проводитися, наприклад, при настанні певної події або при його відсутності, а також при досягненні певного значення параметра сигналу.

Сигнал, по якому здійснюється синхронізація, і основний сигнал можна спостерігати у момент безпосередньо перед запуском розгортки.

Цифрові люмінофорні осцилографи. Цей клас цифрових осцилографів використовує нову архітектуру побудови, яка базується на технології «цифрового люмінофора». Ця технологія в цифровій формі імітує властиву аналоговим осцилографам реального часу зміну інтенсивності зображення. Іншими словами, цифрові люмінофорні осцилографи дозволяють розробникам бачити на екрані, наприклад, модульовані сигнали і всі їх тонкі деталі, як і аналогові осцилографи реального часу, забезпечуючи при цьому їх зберігання, вимірювання і аналіз, як цифрові осцилографи, що запам'ятовують.

Як і інші сучасні цифрові осцилографи, люмінофорні осцилографи мають пам'ять, в якій, зокрема, зберігаються значення різниці часів затримок між різними пробниками.

Цифрові стробоскопічні осцилографи. В цьому класі приладів використовується принцип послідовного стробування миттєвих значень сигналу для перетворення (стискування) його спектру; при кожному повторенні сигналу визначається (відбирається) миттєве значення сигналу в одній точці.

Стробоскопічні осцилографи найбільш широкосмугові (значення смуги пропускання може становить 100 ГГц) і дозволяють досліджувати періодичні сигнали з мінімальною тривалістю. Але слід зазначити, осцилографи цього класу є дуже дорогими, а тому використовуються, як правило, для вирішення складних технічних і виробничих проблем.

Завдяки вище викладеним перевагам цифрові осцилографи зайняли міцні позиції у виробництві контрольний – вимірювальних приладів і майже витіснили з ринку аналогові осцилографи. За даними компанії Frost & Sullivan, частка продажів цифрових осцилографів на світовому ринку в 2007 році складала 87,4% тоді як для аналогових приладів названа цифра 2,8%. На сьогоднішній день в світі існує немало фірм, які займаються розробкою цифрових осцилографів досить давно і пропонують хорошу, сертифіковану, багатофункціональну продукцію. Але із споживчої точки зору вагомим недоліком цих проділів є достатньо висока їх вартість.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Основна:

1. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань : навч. посіб. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
2. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання : навч. посіб. Харків : Харків. нац. ун-т внутр. справ, 2019. 125 с.
3. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 124 с. URL : [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15988/1/Osnovy\\_metrologii.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15988/1/Osnovy_metrologii.pdf) (дата звернення: 18.05.2021).
- 4 Основи метрології та електричних вимірювань. Частина I : конспект лекцій / уклад. В. В. Кухарчук. Вінниця : ВНТУ, 2020. 148 с.

### Допоміжна:

1. Головка Д. Б., Рего К. Г., Скрипник Ю. О. Основи метрології та вимірювань : підруч. Київ : Либідь, 2001. 408 с.
2. Гуржій А.М., Поворознюк Н. І. Електричні і радіотехнічні вимірювання : посіб. для пед. працівників та учнів проф.-техн. навч. закл. Київ : Навчальна книга, 2002. 287 с.
3. Основи метрології та вимірювальної техніки : у 2 т. : підруч. / ред. Б. Стадник. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2002. Т. 2 : Вимірювальна техніка.. 654 с.
4. Радкевич Я. М., Схиртладзе А. Г., Лактионов Б. И. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. для вузов. Москва : Высшая школа, 2004. 767 с.
5. Саранча Г.А. Метрологія, стандартизація і управління якістю : підруч. Київ : Либідь, 2006, 343 с.
6. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань : навч. посіб. Київ : Знання-Прес, 2003. 80 с.

Навчальне видання

МЕТРОЛОГІЯ

Конспект лекцій

Укладачі:

Патрева Л. С.

Каницька І. В.

Формат 60x84 1/16 Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_

Тираж \_\_\_\_\_ прим. Зам № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54029, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.