

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

та електричних вимірювань



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Підручник

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 389.001
ББК 32.85
О75

Автори:

В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко

Затверджено Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як підручник для студентів електроенергетичних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Лист № 1/11-6221 від 15.07.11 р.

Рецензенти:

Б. І. Стадник, доктор технічних наук, професор

М. В. Мислович, доктор технічних наук, професор

Ю. В. Куц, доктор технічних наук, професор

Основи метрології та електричних вимірювань : підручник /
О75 В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. –
Вінниця : ВНТУ, 2012. – 522 с.
ISBN 978-966-641-455-0

В підручнику наведено основні поняття метрології, сучасні підходи до оцінювання результатів вимірювань, метрологічної атестації засобів вимірювальної техніки, подано принципи побудови електромеханічних, електронних, цифрових і мікропроцесорних засобів вимірювань, інформаційно-вимірювальних систем, розглянуто засоби і способи вимірювання електричних, магнітних та неелектричних величин. Підручник відповідає навчальним програмам дисциплін «Основи метрології та електровимірювальна техніка», «Основи метрології та електричних вимірювань», «Інформаційно-вимірювальні системи в електромеханіці», «Контрольно-вимірювальні системи в електроенергетиці» і призначений для студентів напряму підготовки 0507 «Електротехніка та електромеханіка».

УДК 389.001
ББК 32.85

ISBN 978-966-641-455-0

© В. Кухарчук, В. Кучерук, Є. Володарський, В. Грабко, 2012

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	9
Розділ 1	ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ.....	10
1.1	Фізична величина – основне поняття метрології.....	14
1.1.1	Систематизація фізичних величин.....	16
1.1.2	Основне рівняння вимірювання.....	17
1.2	Класифікація вимірювань.....	19
1.2.1	Значущість вимірювань.....	22
1.2.2	Алгоритм виконання вимірювальної процедури.....	22
1.2.3	Основні компоненти вимірювального експерименту.....	25
1.2.4	Умови вимірювання.....	26
1.3	Засоби вимірювальної техніки.....	28
1.3.1	Вимірювальні пристрої.....	29
1.3.2	Засоби вимірювання.....	35
1.4	Методи вимірювань.....	38
1.5	Похибки вимірювань.....	43
1.5.1	Класифікація похибок вимірювання.....	45
1.5.2	Систематичні похибки і методи їх вилучення.....	47
1.5.3	Випадкові похибки.....	52
1.5.4	Оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань.....	60
1.5.5	Методика оцінювання випадкових похибок опосередкованих вимірювань.....	63
1.6	Невизначеність вимірювань.....	68
1.6.1	Джерела та складові невизначеності.....	69
1.6.2	Розширена невизначеність.....	72
1.6.3	Приклад оцінювання невизначеності результатів прямих одноразових вимірювань.....	74
1.6.4	Послідовність оцінювання результату прямих багаторазових вимірювань.....	76
1.6.5	Приклад оцінювання активної і реактивної складової опору при наявності кореляції між вхідними величинами.....	78
1.6.6	Приклад оцінювання характеристик похибки та невизначеності вимірювань.....	80
1.7	Властивості засобів вимірювань.....	85
1.7.1	Статичні метрологічні характеристики.....	85
1.7.2	Похибки засобів вимірювань.....	88
1.7.3	Нормування похибок засобів вимірювань.....	90

1.7.4	Оцінювання статичних метрологічних характеристик.....	98
1.7.5	Динамічні метрологічні характеристики.....	100
1.7.6	Приклад оцінювання метрологічних характеристик.....	113
1.8	Повірка засобів вимірювань.....	117
1.9	Державна система забезпечення єдності вимірювань.....	120
1.9.1	Структура та функції метрологічної служби України.....	123
1.9.2	Міжнародні організації зі стандартизації.....	125
1.9.3	Міжнародна електротехнічна комісія.....	125
1.9.4	Міжнародна організація законодавчої метрології.....	126
Розділ 2	ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ...	127
2.1	Загальні відомості.....	127
2.2	Магнітоелектричні прилади.....	131
2.2.1	Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач.....	131
2.2.2	Магнітоелектричні амперметри.....	134
2.2.3	Магнітоелектричні вольтметри.....	137
2.2.4	Магнітоелектричні гальванометри.....	139
2.2.5	Магнітоелектричні омметри.....	142
2.3	Електромагнітні прилади.....	145
2.3.1	Електромагнітний вимірювальний перетворювач.....	147
2.3.2	Електромагнітні амперметри і вольтметри.....	147
2.4	Електродинамічні прилади.....	150
2.4.1	Електродинамічний вимірювальний перетворювач.....	150
2.4.2	Амперметри, вольтметри і ватметри електродинамічної системи.....	152
2.4.3	Феродинамічний вимірювальний перетворювач.....	157
2.4.4	Електромеханічні частотоміри і фазометри.....	158
2.5	Електростатичні прилади.....	163
2.6	Вимірювальні трансформатори змінного струму і напруги.....	165
2.6.1	Вимірювальні трансформатори струму (ВТС).....	167
2.6.2	Вимірювальні трансформатори напруги (ВТН).....	170
2.7	Вимірювання потужності та електричної енергії.....	171
2.7.1	Вимірювання активної потужності в трифазних колах.....	172
2.7.2	Трифазні ватметри.....	177
2.7.3	Вимірювання реактивної потужності.....	178
2.7.4	Похибки вимірювання потужності, які вносяться вимірювальними трансформаторами.....	181
2.7.5	Вимірювання електричної енергії індукційним	

	лічильником.....	183
Розділ 3	ЕЛЕКТРОННІ АНАЛОГОВІ ПРИЛАДИ.....	189
3.1	Електронні вольтметри.....	189
3.1.1	Електронні вольтметри постійних напруг.....	189
3.1.2	Електронні вольтметри змінних напруг.....	191
3.1.3	Амплітудний (піковий) вольтметр.....	192
3.1.4	Вольтметр середніх квадратичних значень.....	194
3.1.5	Вольтметри середніх значень.....	197
3.2	Електронні частотоміри.....	200
3.2.1	Суть методу заряду і розряду конденсатора.....	200
3.2.2	Електронний конденсаторний частотомір.....	201
3.3	Електронні фазометри.....	202
3.3.1	Електронний фазометр часового перетворення.....	202
3.4	Мостові засоби вимірювань.....	205
3.4.1	Міст Уїтстона. Загальна теорія мостових схем.....	205
3.4.2	Вимірювальні мости постійного струму.....	207
3.4.3	Вимірювальні мости змінного струму.....	211
3.4.4	Автоматичний міст постійного струму.....	216
3.5	Компенсаційні засоби вимірювань.....	218
3.5.1	Компенсатори постійного струму.....	218
3.5.2	Компенсатори змінного струму.....	222
3.6	Вимірювання електричної енергії електронними лічильниками.....	223
3.7	Електронний осцилограф.....	224
3.8	Світлопроменевий осцилограф.....	227
Розділ 4	ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ.....	230
4.1	Квантування і дискретизація. Похибки цифрових вимірювальних приладів.....	230
4.2	Класифікація цифрових вимірювальних приладів.....	232
4.3	Цифрові частотоміри.....	233
4.3.1	Цифровий частотомір середніх значень.....	234
4.3.2	Цифровий періодомір (частотомір миттєвих значень).....	238
4.4	Цифрові фазометри.....	242
4.4.1	Цифровий фазометр миттєвих значень.....	243
4.4.2	Цифровий фазометр середніх значень.....	245
4.5	Цифровий вимірювач параметрів електричного кола.....	249
4.6	Цифрові вольтметри.....	255
4.6.1	Цифровий вольтметр часоімпульсного перетворення.....	256
4.6.2	Цифровий вольтметр послідовного наближення.....	259
4.6.3	Цифровий вольтметр слідкувального зрівноваження.....	263

4.6.4	Цифровий вольтметр порозрядного зрівноваження.....	266
4.7	Аналого-цифрові перетворювачі.....	273
4.7.1	АЦП двотактного інтегрування.....	273
4.7.2	Сигма-дельта АЦП.....	276
4.7.3	Параметри АЦП.....	280
4.7.4	Алгоритм взаємодії АЦП і числового перетворювача.....	284
Розділ 5	ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН.....	288
5.1	Вимірювальні перетворювачі магнітних величин.....	288
5.2	Вимірювання характеристик постійних магнітних полів.....	292
5.3	Вимірювання різниці магнітних потенціалів.....	294
5.4	Вимірювання характеристик постійних магнітних полів веберметром.....	296
5.5	Випробування феромагнітних матеріалів.....	299
5.5.1	Визначення статичних магнітних характеристик.....	299
5.5.2	Визначення динамічних магнітних характеристик.....	301
5.6	Сенсори струму і напруги на основі ефекту Холла.....	306
5.6.1	Сенсори струму компенсаційного типу.....	308
5.6.2	Методика розрахунку параметрів сенсора струму.....	310
5.6.3	Сенсори напруги компенсаційного типу.....	311
Розділ 6	ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	314
6.1	Особливості вимірювання неелектричних величин.....	314
6.2	Узагальнена структурна схема.....	315
6.3	Параметричні вимірювальні перетворювачі.....	317
6.3.1	Резистивні перетворювачі.....	317
6.3.2	Ємнісні перетворювачі.....	326
6.3.3	Індуктивні перетворювачі.....	332
6.4	Генераторні вимірювальні перетворювачі.....	334
6.4.1	Індукційні перетворювачі.....	334
6.4.2	П'єзоелектричні перетворювачі.....	335
6.4.3	Електретні перетворювачі.....	336
6.4.4	Термоелектричні перетворювачі.....	337
6.4.5	Фотоелектричні перетворювачі.....	340
6.5	Принцип дії перетворювачів кутових переміщень.....	341
Розділ 7	МІКРОПРОЦЕСОРНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....	346
7.1	Функції, що виконуються мікропроцесорами у вимірювальних системах.....	349
7.2	Архітектура мікропроцесорної системи.....	354
7.3	Покращення метрологічних характеристик.....	356

7.4	Процесорні похибки вимірювань.....	359
7.5	Характеристика мікроконтролерів фірми ATMEL.....	361
7.6	Мікропроцесорний частотомір.....	364
7.7	Мікропроцесорний фазометр.....	369
7.8	Мікропроцесорний вимірювач струму та напруги.....	372
7.9	Вимірювальний канал потужності.....	376
7.10	Мікропроцесорний вимірювач кутової швидкості.....	380
7.11	Мікропроцесорний вимірювач ковзання.....	384
7.12	Мікропроцесорний вимірювач моменту інерції і динамічного моменту.....	386
7.13	Мікропроцесорний вимірювач кутового положення.....	390
7.14	Вимірювання температури.....	394
7.14.1	Особливості вимірювання температури.....	396
7.14.2	Мікропроцесорний засіб вимірювання температури.....	397
7.15	Вимірювання вібрацій.....	400
Розділ 8	ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	404
8.1	Загальна характеристика ІВС.....	404
8.1.1	Вимірювальний канал.....	405
8.2	Вимірювальна система.....	408
8.2.1	Різновиди вимірювальних систем.....	409
8.3	Стандартні інтерфейси.....	412
8.3.1	Послідовний (каскадний) системний інтерфейс (СІ-К)...	412
8.3.2	Радіальний системний інтерфейс.....	413
8.3.3	Магістральний системний інтерфейс.....	414
8.4	Передавання даних в системах.....	415
8.5	Інтерфейс загального користування.....	418
8.6	Стандартні інтерфейси, що використовуються у сучасній вимірювальній техніці.....	422
8.6.1	Системні шини для підключення інтерфейсних периферійних пристроїв.....	423
8.6.2	Стандартний інтерфейс паралельного передавання даних.....	429
8.6.3	Стандартний інтерфейс послідовного передавання даних (RS-232, RS-422, RS-423, RS-449).....	432
8.6.4	Приладова шина USB.....	435
8.6.5	Інтерфейси мережі.....	439
8.7	Системи автоматизованого контролю.....	443
8.7.1	Основи теорії технічного контролю.....	444
8.7.2	Структура систем контролю.....	449

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

8.7.3	Інформаційна модель процесу контролю.....	451
8.7.4	Показники якості об'єктів контролю.....	453
8.7.5	Основні принципи систем контролю.....	455
8.7.6	Визначення достовірності контролю.....	455
8.7.7	Визначення методичної складової достовірності контролю.....	457
8.7.8	Визначення інструментальної складової достовірності однопараметричного контролю.....	458
8.7.9	Визначення інструментальної складової достовірності багатопараметричного контролю.....	462
8.7.10	Вплив кількості контрольованих параметрів на інструментальну складову достовірності контролю.....	465
8.8	Приклади систем моніторингу, автоматизованого контролю і технічної діагностики.....	466
8.8.1	Приклад автоматизованої системи обліку електричної енергії.....	467
8.8.2	Приклад системи моніторингу вібрацій гідроагрегатів...	473
8.8.3	Приклад системи автоматизованого контролю температури обмоток збудження гідрогенераторів.....	479
8.9	Системи технічної діагностики.....	484
8.9.1	Методи тестового та функціонального діагностування...	485
8.9.2	Критерії та методи розробки алгоритмів діагностування.....	487
8.9.3	Інформаційний критерій пошуку 1-го несправного елемента.....	489
8.9.4	Організація процесів контролю і діагностування.....	491
8.9.5	Приклад системи технічної діагностики асинхронних машин.....	491
	ЛІТЕРАТУРА.....	499
	Додаток А.....	507
	Додаток Б.....	509
	Додаток В.....	510
	Додаток Г.....	511
	ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	512

Світлій пам'яті нашого друга і наукового керівника Володимира Олександровича Поджаренка присвячується

ВСТУП

Підручник написано відповідно до навчальних програм дисциплін «Основи метрології та електровимірювальна техніка», «Основи метрології та електричних вимірювань», «Основи метрології та техніка електричних вимірювань», «Інформаційно-вимірювальні системи в електромеханіці», «Контрольно-вимірювальні системи в електроенергетиці», що їх вивчають студенти електромеханічних та електроенергетичних спеціальностей.

В підручнику розглядаються основи метрології, основи теорії електричних вимірювань, принципи побудови електромеханічних, електронних, цифрових, мікропроцесорних засобів і сучасних методів вимірювання електричних, магнітних та неелектричних величин. Прийнята структура і викладення матеріалу посібника відповідає меті і задачам цих дисциплін. Рівень викладеного матеріалу потребує попередніх знань студентами вищої математики, фізики та основ електротехніки в обсязі навчальних програм даних дисциплін.

Прискорений темп розвитку науки про вимірювання та вимірювальну техніку в останні десятиріччя зумовив появу нових термінів та понять, а також нових підходів до принципів побудови засобів вимірювання та контролю. Викладене нижче дозволяє зрозуміти подальший розвиток метрології – науки про вимірювання.

Частина розділів 1 та 8 написані д. т. н., професором Є. Т. Володарським, де розглядаються сучасні тенденції невизначеності вимірювань та методики її оцінювання, сучасні підходи до побудови та застосування ІВС в електроенергетиці та електромеханіці. Розділи 1 – 6 написані д. т. н., професором В. В. Кухарчуком, в них розглядаються основні поняття метрології, принципи побудови аналогових та цифрових вимірювальних приладів, генераторні і параметричні вимірювальні перетворювачі неелектричних величин, теорія побудови електромеханічних вимірювальних перетворювачів та засобів вимірювання електричних і магнітних величин. Розділи 7, 8 написані д. т. н., професором В. Ю. Кучеруком, в яких даються основи побудови мікропроцесорних вимірювальних систем, вимірювальних каналів електричних та неелектричних величин з мікропроцесорним керуванням, основні принципи побудови вимірювальних систем, систем технічного контролю та діагностики. Частина розділу 8, в якій розглядаються методи побудови систем технічного діагностування, написано д. т. н., професором В. В. Грабком.

Розділ 1 ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Метрологією (від грецьких *метрон* – міра і *логос* – учення) називають науку про вимірювання, методи й засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності.

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 регламентуються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань.

Метрологія є *теоретичною основою* вимірювальної техніки, одного з основних факторів технічного прогресу в усіх галузях діяльності людини. Розвиток метрології полягає, в першу чергу, в удосконаленні теоретичних основ вимірювань, узагальненні практичного досвіду в галузі вимірювань і формуванні подальшого розвитку вимірювальної техніки.

Нормативною основою метрології є державні стандарти та інші документи державної системи забезпечення єдності вимірювань (ДСВ), відповідні нормативні документи Держстандарту України, методичні вказівки та рекомендації.

Організаційною основою метрології є метрологічна служба України.

Технічною основою метрології є: система державних еталонів одиниць фізичних величин, яка забезпечує їх відтворення з найвищою точністю; система робочих еталонів і зразкових засобів вимірювань, за допомогою яких здійснюється передача розмірів одиниць фізичних величин робочим засобам вимірювань; система стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів, що забезпечує відтворення одиниць фізичних величин, які характеризують склад і властивості речовин і матеріалів; система робочих засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час розроблення, виробництва, випробувань і експлуатації продукції, наукових досліджень та інших видів діяльності.

Предметом метрології є отримання кількісної і якісної інформації про властивості об'єктів і процесів, встановлення й застосування наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності і необхідної точності.

Методи метрології – це сукупність фізичних і математичних методів, що використовуються для отримання вимірювальної інформації. До них належать: методи вимірювання, відтворення величин заданого розміру, порівняння величин, вимірювальне перетворення, обробка ре-

зультатів спостережень, планування вимірювального експерименту.

Засоби метрології – різноманітні засоби вимірювань і контролю, які вдосконалюються й розвиваються на основі об'єктивних законів.

Таким чином, засоби метрології включають: сукупність засобів вимірювання й контролю; систему державних еталонів одиниць фізичних величин; систему передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів усім засобам вимірювання за допомогою зразкових засобів перевірки; систему обов'язкової державної і відомчої повірки або метрологічної атестації засобів вимірювання; систему стандартних зразків складу і властивостей речовин, матеріалів.

Напрямки метрології. 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 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.

Єдність вимірювань – це стан вимірювань, за яким їх результати подаються в узаконених одиницях, а похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю.

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.

Методи експериментальної інформатики

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

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

Порівняння – відображення подібності чи відмінності об'єктів логічним висновком.

Загальновідомою є теза «Все пізнається в порівнянні». І справді, методом установлюється насамперед те, що є спільним для ряду об'єктів та явищ і що надалі доцільно зробити предметом більш детального вивчення.

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 є створення матеріальних об'єктів, що характеризуються фізичною величиною наперед заданого значення за допомогою спеціального технічного засобу, який називають мірою.

Відтворення матеріальних об'єктів із заданими довжиною, площею, об'ємом з'явилося задовго до вимірювань. Давньогрецька математика й геометрія ґрунтувались, як відомо, на цілих числах і звичайних дробах, а також сумірних відрізках, площях та об'ємах. Сумірним відрізком був відрізок, кратний меншому відрізкові – мірі. Операції «відмірювання», «відважування», тобто відтворення матеріальних об'єктів, що характеризуються фізичними величинами заданих розмірів, ще у глибокій давнині були найважливішими технологічними операціями у будівництві, торгівлі, землевпорядкуванні. У давній приказці «сім раз відмір та один раз відріж» йдеться про вимірювання, тобто відтворення фізичного об'єкта із заданим розміром конкретної властивості.

Спостереження – 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 за-

снів. Спостереження – складова частина всіх експериментальних методів пізнання. Як метод пізнання спостереження має задовольняти такі основні вимоги: планомірність, цілеспрямованість й систематичність.

Лічба – відображення кількісної властивості певної сукупності матеріальних якісно однорідних предметів числом.

Для здійснення лічби необхідно розрізняти кожен об'єкт із сукупності об'єктів. Лічба ґрунтується на понятті одиниці. У V ст. до нашої ери Евдокс (древньоримський математик та астроном) писав: «Одиниця – це те, згідно з чим кожна окрема річ зветься однією. Число – це множина, складена з одиниць».

Вимірювання – 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 – відображення відповідності між станом об'єкта і заданою нормою відповідним висновком (придатний, непридатний).

Підлягає контролю головним чином стан предметів виробництва та навколишнього середовища. В техніці переважає контроль фізичних величин та параметрів процесів. Контроль параметрів – відображення співвідношення між контрольованим параметром та нормою.

Ідентифікація – відображення залежності між величинами, що характеризують матеріальний об'єкт, математичною або логічною моделлю.

Ідентифікацію розпочинають із визначення типу моделі об'єкта, що відображає залежність між його параметрами, після чого визначають основні параметри моделі, ступінь, точність і вірогідність оцінки.

Діагностика – відображення загального стану об'єкта та причин цього стану діагнозом із зазначенням особливостей стану і локалізацією відхилень від норм.

Розпізнавання об'єктів – відображення даного об'єкта за сукупністю його властивостей одним із класів множини цих об'єктів.

Розпізнавання об'єктів проводиться шляхом сприйняття їхніх характеристик, порівняння й аналізу на основі попередньої класифікації даної множини об'єктів.

Випробування – відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом.

Експериментальні дослідження – 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 дос-

лідження дає можливість більш ефективно використовувати усі інші експериментальні методи пізнання – від спостереження до експериментального дослідження.

Контрольні питання

1. Розкрийте поняття «метрологія».
2. Наведіть п'ять основних напрямків метрології.
3. Що є предметом метрології? Назвіть методи й засоби метрології.
4. Назвіть основні методи експериментальної інформатики.
5. Розкрийте поняття «вимірювання».
6. Розкрийте поняття «контроль».
7. Розкрийте поняття «діагностика».

1.1 Фізична величина – основне поняття метрології

Вихідним поняттям метрології є поняття про фізичну величину.

Фізична величина (ФВ) – це властивість, загальна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них.

ФВ – властивість явища чи тіла, яка може бути розрізнена якісно і визначена кількісно.

Формалізованим відображенням якісних відмінностей вимірюваних величин є їх *розмірність*, а кількісною характеристикою – їхній *розмір*. Отримання достовірної кількісної експериментальної інформації про розмір ФВ – це основний зміст вимірювання.

Значення (фізичної) величини – відображення фізичної величини у вигляді числового значення величини з позначенням її одиниці

$$A = \{A\} [A],$$

де $\{A\}$ – числове значення ФВ, тобто число, що дорівнює відношенню розміру вимірюваної величини до розміру одиниці цієї ФВ чи кратної одиниці; $[A]$ – позначення номера одиниці.

Наприклад: значення електричної напруги $U = 220 \text{ В}$, значення сили електричного струму $I = 10 \text{ А}$.

Існують **системи ФВ**, тобто сукупності взаємопов'язаних ФВ, в яких декілька величин беруть за незалежні, а інші визначають як залежні від них. ФВ, що входить до системи величин і взята за незалежну від інших величин цієї системи, є **основною ФВ**, а ФВ, що входить до системи величин та визначається через основні величини цієї системи, є **похідною ФВ**.

Розмірністю ФВ є вираз, що відображає її зв'язок з основними величинами системи величин:

основної ФВ – умовний символ ФВ у даній системі величин; *похі-*

дної ΦB – добуток розмірностей основних величин, піднесених до відповідних степенів.

Наприклад: розмірність швидкості V у системі величин L (довжина), M (маса), T (час) – $\dim V = LT^{-1}$.

Одиницею ΦB є величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних із нею величин.

Основна одиниця – одиниця основної ΦB в певній системі величин.

Похідна одиниця – одиниця похідної ΦB в певній системі одиниць.

Позасистемна одиниця ΦB – одиниця величини, що не належить до даної системи одиниць.

Наприклад: **електронвольт (eV)** – позасистемна одиниця енергії відносно системи SI; **доба, година, хвилина** – позасистемні одиниці часу відносно системи SI.

У країнах світу загальноприйнята Міжнародна система одиниць ΦB (Système Internationale d'unités, SI), яка була прийнята XI Генеральною конференцією з мір та ваги (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM, ГКМВ) в 1960 році і уточнювалася на XII-XX ГКМВ.

Система складається з 7 основних і 2 додаткових одиниць, а також 113 похідних одиниць, в тому числі одиниць електричних і магнітних величин – 40.

Основні одиниці системи SI: **довжина** – метр (m); **маса** – кілограм (kg); **час** – секунда (s); **сила електричного струму** – ампер (A); **термодинамічна температура** – кельвін (K); **сила світла** – кандела (cd); **кількість речовини** – моль (mol), а додаткові одиниці: **плоский кут** – радіан (rad); **тілесний кут** – стерадіан (sr).

Основна одиниця електрики і магнетизму – **ампер**, що дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках безмежної довжини і мізерно малого кругового перерізу, розташованих на відстані 1 м один від іншого у вакуумі, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

18 похідних одиниць SI ГКМВ мають спеціальні назви і 16 одиниць, які мають назви за прізвищами учених, в тому числі: **ват** ($Вт$, W), **вебер** ($Вб$, Wb), **вольт** ($В$, V), **генрі** ($Гн$, H), **герц** ($Гц$, Hz), **кулон** ($Кл$, C), **ом** ($Ом$, Ω), **сименс** ($См$, S), **тесла** ($Тл$, T), **фарад** ($Ф$, F).

На практиці широко застосовуються кратні та частинні одиниці ΦB . **Кратна одиниця ΦB** – це одиниця величини, яка в ціле число разів більша за одиницю, від якої вона утворюється; **частинна одиниця** – одиниця, яка в ціле число разів менша за одиницю, від якої вона утворюється.

1.1.1 Систематизація фізичних величин

Розгляд фізичних величин в їх різних аспектах обмежимо лише тими ознаками, які викликають найбільший інтерес з точки зору отримання вимірювальної інформації (рис. 1.1).

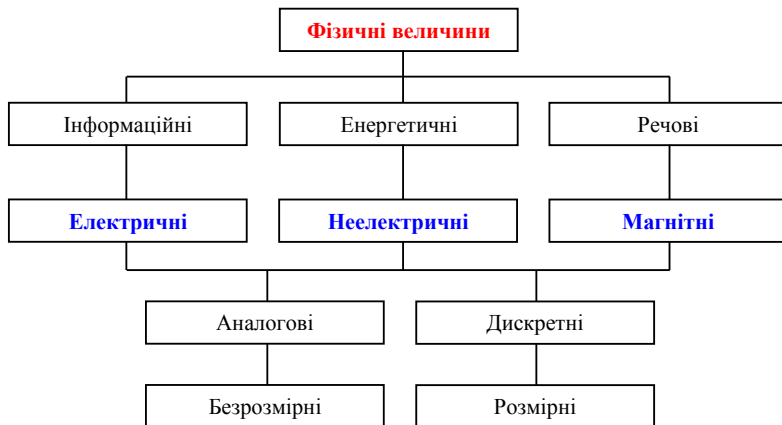


Рисунок 1.1

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 управління технологічними процесами.

Вимірювання величин **енергетичної** групи необхідне для вивчення і управління процесами перетворення, передавання і використання енергії.

Величини **інформаційної** групи відображають динамічні та статичні характеристики процесів. Вимірювання даних величин необхідне для якісного і ефективного управління.

За родом величини всі фізичні величини поділяють на **електричні**, **неелектричні**, **магнітні**.

Відзначимо, що число електричних і магнітних ФВ, що підлягають вимірюванню, нині стабілізувалось і не перевищує 100. У той самий час число неелектричних ФВ, які вимірюються і які необхідно вимірювати, з кожним роком зростає і на початок XXI ст. перевищило 4000. Це свідчить про пріоритетний розвиток аналітичного приладобудування, засобів технологічного контролю, засобів вимірювань і контролю навколи-

пного середовища, а також засобів контролю речовин, матеріалів і виробів.

За числом значень, яких може набути вимірювана величина на скінченному проміжку часу чи простору, ФВ поділяються на **неперервні** (аналогові) й **дискретні**.

Аналоговою називають фізичну величину, яка на кінцевому часовому інтервалі в заданому діапазоні набуває нескінченної кількості значень.

Квантованою називають фізичну величину, що поділена на рівні за розміром частини – кванти.

Розрізняють неперервну за значенням і в часі ФВ, квантовану за значенням і неперервну в часі ФВ, неперервну за значенням і дискретизовану у часі ФВ, квантовану за значенням і дискретизовану у часі ФВ.

За наявністю розмірності розрізняють **розмірні (абсолютні) ФВ**, **безрозмірні (відносні) ФВ**.

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

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

Контрольні питання

1. В чому суть основного поняття метрології – фізичної величини? Наведіть систематизацію ФВ.
2. Які ФВ відносять до інформаційних, енергетичних, речових?
3. На які три великі класи поділяють ФВ за її родом?
4. Наведіть приклади аналогових і дискретних ФВ.

1.1.2 Основне рівняння вимірювання

Відмінність ФВ, визначена різними властивостями явищ, відображає лише одну їх сторону – якісну. А поняття ФВ містить й іншу сторону – кількісну, що є індивідуальною для кожного об'єкта і оцінюваною числовим значенням величини. Останнє дає можливість порівнювати фізичні величини і виконувати над ними математичні операції.

Вимірювання фізичних величин є одним з найважливіших експериментальних методів пізнання, що ґрунтується на принципі відображення, в якому чітко розрізняється предмет відображення, в даному випадку ФВ певного розміру, і результат відображення, тобто значення ФВ.

Основною операцією, що дозволяє отримати результат вимірювання, є операція порівняння вимірюваної величини X та величини, прийнятої за зразок $[x]$. Відома аксіома Евдокса-Архімеда: «Якщо на прямій

дано два відрізки $A < B$, то можна A повторити додатними стільки разів, щоб сума була більшою B : $A + A + \dots + A = A \cdot (N + 1) > B$.

Якщо $A \cdot N < B, B \gg A$, то з цієї аксіому отримуємо рівняння, що основане на припущенні рівності всіх відрізків A , які підсумовуються всередині відрізка B :

$$N = \frac{B}{A}$$

Прийнявши $X = B$, а $A = [x]$, отримаємо

$$N = \frac{X}{[x]}$$

Останнє співвідношення, подане у вигляді

$$X = N \cdot [x],$$

називають **основним рівнянням вимірювання**.

Таким чином, для реалізації вимірювання у найтривіальнішому випадку необхідно виконати дві операції: операцію відтворення зразкової величини $[x]$; операцію порівняння вимірюваної X і зразкової $[x]$.

Кількісна оцінка вимірюваної величини має відповідати двом вимогам: внаслідок вимірювання потрібно отримати не просто число, а число іменоване, тобто в певних одиницях, загальноприйнятих для даної величини (наприклад, $I = 5 [A]$); результат вимірювання має містити оцінку точності отриманого значення вимірюваної величини ($I = 5 [A] \pm \Delta$).

Характерною рисою вимірювання є також те, що цей процес обов'язково передбачає той чи інший, простий чи складний фізичний експеримент. Кількісну інформацію про величину не можна отримати тільки теоретичними розрахунками. Якщо значення величини отримують розрахунком, то використані в цих випадках розрахункові формули обов'язково повинні містити значення інших величин, що визначаються експериментально.

Контрольні питання

1. Виведіть основне рівняння вимірювання.
2. Яка основна операція виконується під час вимірювання?
3. Без яких двох метрологічних операцій неможливе вимірювання?
4. Які дві вимоги висувають до результату вимірювання?
5. Що є характерною рисою вимірювання?
6. Аналізуючи аксіому Евдокса-Архімеда, поясніть механізм виникнення похибки вимірювання.
7. Яку сторону явища характеризують вимірювання: якісну чи кількісну?
8. Наведіть основне рівняння вимірювання для струму, напруги, частоти, потужності.

1.2 Класифікація вимірювань

Найбільш поширеними характеристиками матеріальних об'єктів та процесів є величини і залежності між ними. Якраз про них створюється інформація за допомогою засобів вимірювання. Вимірювання є дуже різноманітними і кількість їх різновидів зростає. Свідченням цього є динамічні вимірювання та сумісні вимірювання величин.

Для класифікації вимірювань необхідно встановити їх найбільш суттєві ознаки (рис. 1.2).

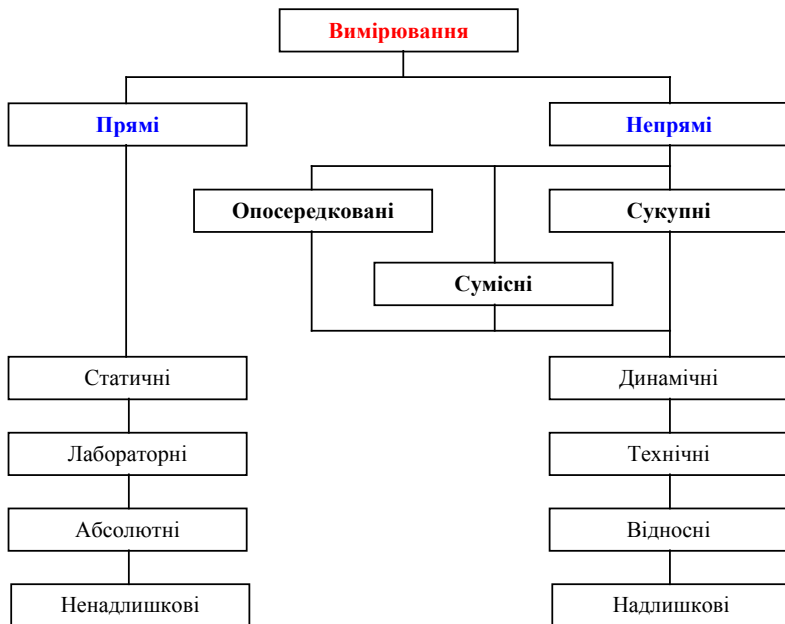


Рисунок 1.2

До найбільш суттєвих ознак різних вимірювань відносять:

- відсутність чи наявність в процедурі вимірювання перетворення роду вимірюваної величини та обчислення її значення за відомими залежностями;
- вид рівняння вимірювання;
- призначеність вимірювання для незмінних чи змінних в часі вимірюваних величин;
- особливості визначення похибок вимірювань;

– наявність чи відсутність розмірності у вимірюваній величині;
– співвідношення між кількістю вимірюваних величин та кількістю вимірювань.

За відсутністю чи наявністю в процедурі вимірювань перетворення роду вимірюваної ФВ та обчислення її значення за відомими залежностями вимірювання класифікують на прямі та непрямі.

Пряме вимірювання. Вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей.

Для реалізації прямих вимірювань фізичної величини X необхідно мати пристрій порівняння а також багатозначну міру з відповідним діапазоном зміни значень чи однозначну міру та масштабний вимірювальний перетворювач. При всіх інших однакових умовах прямим вимірюванням притаманні мінімальні похибки.

Непряме вимірювання. Вимірювання, у якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо.

Непрямі вимірювання поділяються на опосередковані, сумісні та сукупні.

Опосередковане вимірювання. 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 перетворення, або шляхом числового вимірювального перетворення. Наприклад, при опосередкованих вимірюваннях потужності постійного струму її визначають чи на основі прямих вимірювань струму та напруги за формулою $P = U \cdot I$, чи на основі фізичного вимірювального перетворення добутку $U \cdot I$ в іншу фізичну величину. При автоматичних опосередкованих вимірюваннях прямі вимірювання входних величин аргументів та числові вимірювальні перетворення результатів їхніх вимірювань із метою знаходження значення опосередковано вимірюваної величини здійснюються автоматично всередині засобу вимірювання.

Сукупне вимірювання. Непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних 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 ФВ за неможливості їх-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-455-0>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-455-0>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page
<http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-455-0>

Навчальне видання

**Василь Васильович Кухарчук
Володимир Юрійович Кучерук
Євген Тимофійович Володарський
Володимир Віталійович Грабко**

Основи метрології та електричних вимірювань

Підручник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено В. Кухарчуком

Підписано до друку 28.02.2012 р.
Формат 29,7 × 42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 22,7
Наклад 500 (1-й запуск 1-150) прим. Зам. № 2012-033

Вінницький національний технічний університет,
комп'ютерний інформаційно-видавничий центр.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.