

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ	10
1.1. Фізична величина – основне поняття метрології	14
1.1.1. Систематизація фізичних величин	15
1.1.2. Основне рівняння вимірювання	17
1.2. Класифікація вимірювань	18
1.2.1. Значущість вимірювань	21
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	27
1.3.1. Вимірювальні пристрої	28
1.3.2. Засоби вимірювання	35
1.4. Методи вимірювань	37
1.5. Похибки вимірювань	42
1.5.1. Класифікація похибок вимірювання	45
1.5.2. Систематичні похибки і методи їх вилучення	46
1.5.3. Випадкові похибки	51
1.5.4. Оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань	59
1.5.5. Методика оцінювання випадкових похибок опосередкованих вимірювань	62
1.6. Невизначеність вимірювань	68
1.6.1. Джерела та складові невизначеності	69
1.6.2. Розширена невизначеність	73
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 та реактивної складової опору при наявності кореляції між вхідними величинами	79
1.6.6. Приклад оцінювання характеристик похибки та невизначеності вимірювань	82
1.7. Властивості засобів вимірювань	87
1.7.1. Статичні метрологічні характеристики	88
1.7.2. Похибки засобів вимірювань	91
1.7.3. Нормування похибок засобів вимірювання	93
1.7.4. Оцінювання статичних метрологічних характеристик	101
1.7.5. Динамічні метрологічні характеристики	102
1.7.6. Приклад оцінювання метрологічних характеристик	117
1.8. Повірка засобів вимірювальної техніки	122

1.9.	Державна система забезпечення єдності вимірювань _____	125
1.9.1.	Структура та функції метрологічної служби України _____	128
1.9.2.	Міжнародні організації зі стандартизації _____	129
1.9.3.	Міжнародна електротехнічна комісія _____	130
1.9.4.	Міжнародна організація законодавчої метрології _____	130
РОЗДІЛ 2 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ _____		132
2.1.	Загальні відомості _____	132
2.2.	Магнітоелектричні прилади _____	136
2.2.1.	Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач _____	136
2.2.2.	Магнітоелектричні амперметри _____	140
2.2.3.	Магнітоелектричні вольтметри _____	142
2.2.4.	Магнітоелектричні гальванометри _____	145
2.2.5.	Магнітоелектричні омметри _____	148
2.3.	Електромагнітні прилади _____	152
2.3.1.	Електромагнітний вимірювальний перетворювач _____	152
2.3.2.	Електромагнітні амперметри та вольтметри _____	154
2.4.	Електродинамічні прилади _____	156
2.4.1.	Електродинамічний вимірювальний перетворювач _____	156
2.4.2.	Амперметри, вольтметри і ватметри електродинамічної системи _____	159
2.4.3.	Феродинамічний вимірювальний перетворювач _____	163
2.4.4.	Електромеханічні частотоміри і фазометри _____	165
2.5.	Електростатичні прилади _____	169
2.6.	Вимірювальні трансформатори змінного струму та напруги _____	172
2.6.1.	Вимірювальні трансформатори струму (ВТС) _____	173
2.6.2.	Вимірювальні трансформатори напруги (ВТН) _____	176
2.7.	Вимірювання потужності та електричної енергії _____	178
2.7.1.	Вимірювання активної потужності в трифазних колах _____	178
2.7.2.	Трифазні ватметри _____	183
2.7.3.	Вимірювання реактивної потужності _____	184
2.7.4.	Похибки вимірювання потужності, які вносяться вимірювальними трансформаторами _____	188
2.7.5.	Вимірювання електричної енергії індукційними лічильниками _____	190
РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОННІ АНАЛОГОВІ ПРИЛАДИ _____		196
3.1.	Електронні вольтметри _____	196
3.1.1.	Електронні вольтметри постійних напруг _____	196
3.1.2.	Електронні вольтметри змінних напруг _____	198
3.1.3.	Амплітудний (піковий) вольтметр _____	199
3.1.4.	Вольтметр середніх квадратичних значень _____	201
3.1.5.	Вольтметри середніх значень _____	204
3.2.	Електронні частотоміри _____	207
3.2.1.	Суть методу заряду і розряду конденсатора _____	207

3.2.2.	Електронний конденсаторний частотомір _____	208
3.3.	Електронні фазометри _____	210
3.3.1.	Електронний фазометр часового перетворення _____	210
3.4.	Мостові засоби вимірювань _____	213
3.4.1.	Міст Уїтстона. Загальна теорія мостових схем _____	213
3.4.2.	Вимірювальні мости постійного струму _____	215
3.4.3.	Вимірювальні мости змінного струму _____	220
3.4.4.	Автоматичний міст постійного струму _____	225
3.5.	Компенсаційні засоби вимірювань _____	227
3.5.1.	Компенсатори постійного струму _____	227
3.5.2.	Компенсатори змінного струму _____	229
3.6.	Вимірювання електричної енергії електронними лічильниками _____	232
3.7.	Електронний осцилограф _____	234
3.8.	Світлопроменевий осцилограф _____	237

РОЗДІЛ 4 ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ _____ 240

4.1.	Квантування і дискретизація. Похибки цифрових вимірювальних приладів _____	240
4.2.	Класифікація цифрових вимірювальних приладів _____	242
4.3.	Цифрові частотоміри _____	244
4.3.1.	Цифровий частотомір середніх значень _____	244
4.3.2.	Цифровий періодомір (частотомір миттєвих значень) _____	249
4.4.	Цифрові фазометри _____	253
4.4.1.	Цифровий фазометр миттєвих значень _____	254
4.4.2.	Цифровий фазометр середніх значень _____	257
4.5.	Цифровий вимірювач параметрів електричного кола _____	261
4.6.	Цифрові вольтметри _____	267
4.6.1.	Цифровий вольтметр часоімпульсного перетворення _____	267
4.6.2.	Цифровий вольтметр послідовного наближення _____	271
4.6.3.	Цифровий вольтметр слідувального зрівноважування _____	275
4.6.4.	Цифровий вольтметр порозрядного зрівноваження _____	278
4.7.	Аналого-цифрові перетворювачі _____	285
4.7.1.	АЦП двотактного інтегрування _____	286
4.7.2.	Сигма-дельта АЦП _____	289
4.7.3.	Параметри АЦП _____	294
4.7.4.	Алгоритм взаємодії АЦП і числового перетворювача _____	298

РОЗДІЛ 5	ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН	303
5.1.	Вимірювальні перетворювачі магнітних величин	303
5.2.	Вимірювання характеристик постійних магнітних полів	308
5.3.	Вимірювання різниці магнітних потенціалів	310
5.4.	Вимірювання характеристик постійних магнітних полів веберметром	311
5.5.	Випробування феромагнітних матеріалів	314
5.5.1.	Визначення статичних магнітних характеристик	315
5.5.2.	Визначення динамічних магнітних характеристик	318
5.6.	Сенсори струму і напруги на основі ефекту Холла	323
5.6.1.	Сенсори струму компенсаційного типу	324
5.6.2.	Методика розрахунку параметрів сенсора струму	326
5.6.3.	Сенсори напруги компенсаційного типу	327
РОЗДІЛ 6	ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН	330
6.1.	Особливості вимірювання неелектричних величин	330
6.2.	Узагальнена структурна схема	331
6.3.	Параметричні вимірювальні перетворювачі	333
6.3.1.	Резистивні перетворювачі	333
6.3.2.	Ємнісні перетворювачі	344
6.3.3.	Індуктивні перетворювачі	350
6.4.	Генераторні вимірювальні перетворювачі	352
6.4.1.	Індукційні перетворювачі	353
6.4.2.	П'єзоелектричні перетворювачі	354
6.4.3.	Електретні перетворювачі	355
6.4.4.	Термоелектричні перетворювачі	356
6.4.5.	Фотоелектричні перетворювачі	359
6.5.	Принцип дії перетворювачів кутових переміщень	360
РОЗДІЛ 7	МІКРОПРОЦЕСОРНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ	366
7.1.	Функції, що виконуються мікропроцесорами у вимірювальних системах	369
7.2.	Архітектура мікропроцесорної системи	373
7.3.	Покращення метрологічних характеристик	375
7.4.	Процесорні похибки вимірювань	377
7.5.	Характеристика мікроконтролерів фірми ATMEL	379
7.6.	Мікропроцесорний частотомір	383
7.7.	Мікропроцесорний фазометр	388
7.8.	Мікропроцесорний вимірювач струму та напруги	391
7.9.	Вимірювальний канал потужності	395
7.10.	Мікропроцесорний вимірювач кутової швидкості	399
7.11.	Мікропроцесорний вимірювач ковзання	403
7.12.	Мікропроцесорний вимірювач моменту інерції і динамічного моменту	406
7.13.	Мікропроцесорний вимірювач кутового положення	410

7.14.	Вимірювання температури _____	414
7.14.1.	Особливості вимірювання температури _____	416
7.14.2.	Мікропроцесорний засіб вимірювання температури _____	417
7.15.	Вимірювання вібрацій _____	420
РОЗДІЛ 8	ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ _____	425
8.1.	Загальна характеристика ІВС _____	425
8.1.1.	Вимірювальний канал _____	426
8.2.	Вимірювальна система _____	429
8.2.1.	Різновиди вимірювальних систем _____	431
8.3.	Стандартні інтерфейси _____	433
8.3.1.	Послідовний (каскадний) системний інтерфейс (CI-K) _____	433
8.3.2.	Радіальний системний інтерфейс (CI-P) _____	434
8.3.3.	Магістральний системний інтерфейс (CI-M) _____	435
8.4.	Передавання даних в системах _____	436
8.5.	Інтерфейс каналу загального користування _____	438
8.6.	Стандартні інтерфейси, що використовуються у сучасній вимірювальній техніці _____	442
8.6.2.	Стандартний інтерфейс паралельного передавання даних (GPIB) _____	448
8.6.3.	Стандартний інтерфейс послідовного передавання даних (RS-232, RS-422, RS-423, RS-449) _____	452
8.6.4.	Приладова шина USB _____	454
8.6.5.	Інтерфейси мережі _____	458
8.7.	Системи автоматизованого контролю _____	462
8.7.1.	Основи теорії технічного контролю _____	463
8.7.2.	Структура систем контролю _____	467
8.7.3.	Інформаційна модель процесу контролю _____	469
8.7.4.	Показники якості об'єктів контролю _____	471
8.7.5.	Основні принципи контролю _____	473
8.7.6.	Визначення достовірності контролю _____	473
8.7.7.	Визначення методичної складової достовірності контролю _____	475
8.7.8.	Визначення інструментальної складової достовірності однопараметричного контролю _____	476
8.7.9.	Визначення інструментальної складової достовірності багатопараметричного контролю _____	481
8.7.10.	Вплив кількості контрольованих параметрів на інструментальну складову достовірності контролю _____	483
8.8.	Приклади систем моніторингу, автоматизованого контролю і технічної діагностики _____	485
8.8.1.	Приклад автоматизованої системи обліку електричної енергії _____	486
8.8.2.	Приклад системи моніторингу вібрацій гідроагрегатів _____	491
8.8.3.	Приклад системи автоматизованого контролю температури обмоток збудження гідрогенераторів _____	497

8.9.	Системи технічної діагностики _____	502
8.9.1.	Методи тестового та функціонального діагностування _____	504
8.9.2.	Критерії та методи розробки алгоритмів діагностування _____	505
8.9.3.	Інформаційний критерій пошуку 1-го несправного елемента _____	507
8.9.4.	Організація процесів контролю і діагностування _____	510
8.9.5.	Приклад системи технічної діагностики асинхронних машин _____	510
ЛІТЕРАТУРА _____		517
ДОДАТОК А _____		523
ДОДАТОК Б _____		525
ДОДАТОК В _____		526
ДОДАТОК Г _____		527
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК _____		528

*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 написано 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.