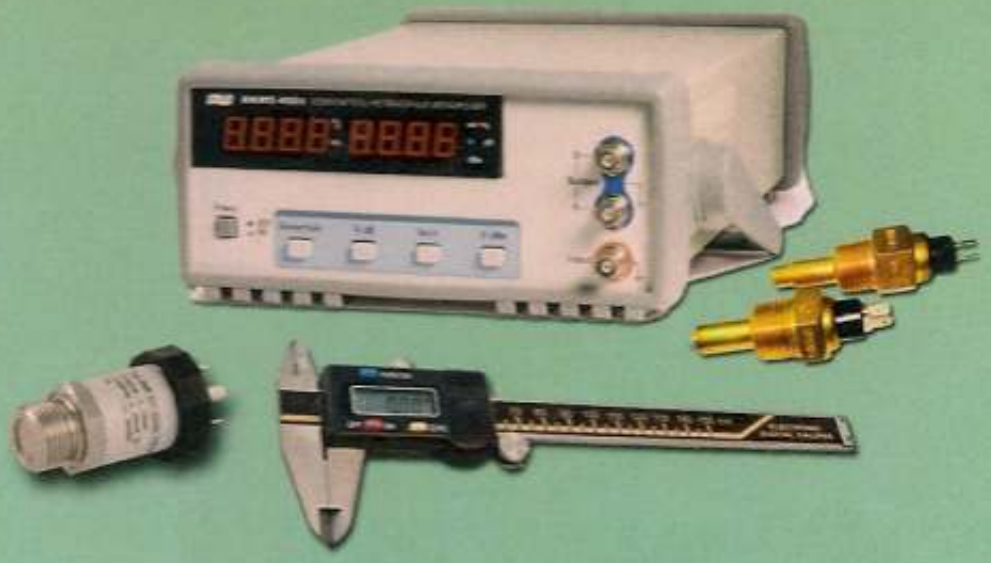
389 1
З-36

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОВІТРЯНИХ СИЛ
імені ІВАНА КОЖЕДУБА

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Частина 2

ДАТЧИКИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН



Харків
2016

389.1
З-36

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОВІТРЯНИХ СИЛ
імені ІВАНА КОЖЕДУБА

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Частина 2

ДАТЧКИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Підручник

А030055

БІБЛІОТЕКА ХУПС
№ 129588/002
НАВЧАЛЬНИЙ ФОНД

Харків
2016

УДК 389.1
ББК 321.317.(075.8)
З-36

Рекомендовано до друку вченою радою Харківського університету Повітряних Сил (протокол № 16 від 17.12.2013)

Автори: В. Б. Кононов (розд. 4, 5, 6); А. М. Науменко (розд. 7, 8, 9, 10, 11); І. В. Толок (розд. 12, 13); С. С. Котляр (розд. 14, 15)

Рецензенти: С. І. Кондрашов, професор, доктор технічних наук;
І. В. Руженцев, професор, доктор технічних наук;
О. В. Гайдачук, професор, доктор технічних наук

Засоби вимірювальної техніки неелектричних величин. Ч. 2
З-36 Датчики вимірювання фізичних величин : підручник / В. Б. Кононов, А. М. Науменко, І. В. Толок, С. С. Котляр. – Х. : ХУПС, 2016. – 408 с.

У другій частині підручника наведені основні технічні характеристики датчиків фізичних величин, їх метрологічні характеристики та похибки перетворення неелектричних величин у електричні.

Призначений для курсантів та студентів вищих закладів освіти, а також інженерно-технічних працівників у галузі вимірювальної техніки.

Перша частина «Засоби неелектричних величин» вийшла друком у 2015 році.

УДК 389.1
ББК 321.317.(075.8)

© Кононов В. Б., Науменко А. М., Толок, І. В., Котляр С. С., 2016
©Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ 9
УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ 10
ПЕРЕДМОВА 12
Розділ 4. ДАТЧИКИ ТА СИСТЕМИ 13
4.1. Датчики, сигнали та системи 13
4.2. Класифікація датчиків 21
4.3. Характеристики датчиків 25
4.3.1. Передавльна функція 25
4.3.2. Діапазон вимірюваних значень 29
4.3.3. Діапазон вихідних значень 30
4.3.4. Точність 31
4.3.5. Калібрування 33
4.3.6 .Похибка калібрування 35
4.3.7. Гістерезис 37
4.3.8. Нелінійність 37
4.3.9. Насичення 39
4.3.10. Відтворюваність 40
4.3.11. Мертва зона 41
4.3.12. Чутливість 41
4.3.13. Спеціальні характеристики 42
4.3.14. Вихідний імпеданс 42
4.3.15. Сигнал збудження 43
4.3.16. Динамічні характеристики 43
4.3.17. Чинники навколишнього середовища 49
4.3.18. Надійність 53
4.3.19. Характеристики датчиків, що обумовлені умовами їх застосування 56
4.3.20. Статистична оцінка 56
Контрольні запитання та завдання 60

Розділ 5. ДЕТЕКТОРИ ПРИСУТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ 61
5.1. Ультразвукові датчики присутності 63
5.2. Мікрохвильові детектори руху 66
5.3. Ємнісні датчики присутності 73
5.4. Електростатичні датчики руху 79
5.5. Оптоелектронні детектори руху 82
5.5.1. Структура датчиків 83
5.5.2. Складові датчики 84
5.6. Детектори руху, що працюють у видимому і ближньому ІЧ діапазонах спектра 87
5.7. Детектори руху, що працюють в далекому ІЧ діапазоні 89
5.8. Детектори руху на основі пасивних ІЧ елементів 90
5.9. Аналіз ефективності роботи пасивного ІЧ детектора рухомих об'єктів 95
Контрольні запитання та завдання 100
Розділ 6. ДЕТЕКТОРИ ПОЛОЖЕННЯ, ЗМІЩЕННЯ ТА РІВНЯ 101
6.1. Потенціометричні датчики 101
6.2. Гравітаційні датчики 104
6.3. Ємнісні датчики 107
6.4. Індуктивні та магнітні датчики 112
6.4.1. Лінійно-регульовані диференційні трансформатори (ЛРДТ) і поворотно-регульовані диференціальні трансформатори (ПРДТ) 113
6.4.2. Вихрострумові датчики 115
6.4.3. Поперечний індуктивний датчик 117
6.4.4. Датчики наближення, що використовують ефект Холла 119
6.4.5. Магніторезистивні датчики 124
6.4.6. Магнітострикційний детектор 129
6.5. Оптичні датчики 131
6.5.1. Оптичні мостові схеми 131

6.5.2. Поляризаційний детектор наближення 132
6.5.3. Оптоволоконні датчики 134
6.5.4. Датчики Фабрі – Перо 135
6.5.5. Гратчасті датчики 139
6.5.6. Позиційно-чутливі детектори 141
6.6. Ультразвукові датчики 146
6.7. Радари 146
6.7.1. Мікропотужні імпульсні радари 146
6.7.2. Радар для зондування грутну 149
6.8. Датчики товщини і рівня 152
6.8.1. Датчики абляції 152
6.8.2. Детектори товщини плівок 154
6.8.3. Датчики рівня рідини 156
Контрольні запитання та завдання 158
Розділ 7. ДАТЧИКИ СИЛИ ТА МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ 159
7.1. Тензодатчики 162
7.2. Тактильні чутливі елементи 164
7.3. П'єзоелектричні датчики сили 174
Контрольні запитання та завдання 177
Розділ 8. ДАТЧИКИ ТИСКУ 178
8.1. П'єзорезистивні датчики 178
8.2. Ємнісні датчики 185
8.3. Датчики змінного магнітного опору 187
8.4. Оптоелектронні датчики 189
8.5. Вакуумні датчики 192
8.5.1. Вакуумметр Пірані 192
8.5.2. Іонізаційні датчики 195
8.5.3. Датчик газового опору 196
Контрольні запитання та завдання 197
Розділ 9. ВИТРАТОМІРИ 198
9.1. Основи гідродинаміки 198

9.2. Датчики швидкості потоку за перепадом тиску 201
9.3. Теплові витратоміри 203
9.4. Ультразвукові витратоміри 209
9.5. Електромагнітні витратоміри 213
9.6. Мікровитратоміри 216
9.7. Детектор вимірювання швидкості потоку газу 220
9.8. Коріолісові витратоміри 221
9.9. Витратоміри з мішенями 223
Контрольні запитання та завдання 228
Розділ 10. АКУСТИЧНІ ДАТЧИКИ 229
10.1. Резистивні мікрофони 229
10.2. Електростатичні мікрофони 230
10.3. Оптоволоконні мікрофони 232
10.4. П'єзоелектричні мікрофони 234
10.5. Електретні мікрофони 236
10.6. Твердотільні акустичні детектори 239
Контрольні запитання та завдання 242
Розділ 11. ДАТЧИКИ ВОЛОГОСТІ 243
11.1. Загальні положення 243
11.2. Ємнісні датчики 246
11.3. Резистивні датчики вологості 250
11.4. Термісторні датчики вологості 253
11.5. Оптичний гігрометр 254
11.6. Вібраційній гігрометр 255
Контрольні запитання та завдання 256
Розділ 12. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ 257
12.1. Загальні відомості 257
12.2. Терморезистивні датчики 263
12.2.1. Резистивні детектори температури 263
12.2.2. Кремнієві резистивні датчики 265
12.2.3. Термістори 267

12.3. Термоелектричні контактні датчики 288
12.3.1. Схеми підключення термопар 289
12.3.2. Термопарні модулі 292
12.4. Напівпровідникові датчики температури на основі *p-n* переходу 295
12.5. Оптичні датчики температури 301
12.5.1. Флуоресцентні датчики 302
12.5.2. Інтерферометричні датчики 304
12.5.3. Датчики на основі розчинів, що змінюють колір під впливом температури 305
12.6. Акустичні датчики температури 306
12.7. П'єзоелектричні датчики температури 308
Контрольні запитання та завдання 309
Розділ 13. ДАТЧИКИ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 310
13.1. Загальні відомості 310
13.2. Детектори ІЧ випромінювання 315
13.3. Чарунки Голея 316
13.4. Детектори випромінювань на основі термоелементів 318
13.5. Піроелектричні датчики ІЧ випромінювань 321
13.6. Болометр 326
13.7. Активний датчик випромінювання дальнього ІЧ діапазону 330
13.8. Детектори газового полум'я 334
Контрольні запитання та завдання 337
Розділ 14. ХІМІЧНІ ДАТЧИКИ 338
14.1. Характеристики хімічних датчиків 339
14.2. Проблеми хімічних датчиків 339
14.3. Класифікація хімічних детекторів 341
14.4. Датчики прямої дії 342
14.4.1. Металооксидні хімічні датчики 343
14.4.2. Хімічні польові транзистори 344
14.4.3 Електрохімічні датчики 346
14.4.4. Потенціометричні датчики 348

14.4.5. Кондуктометричні датчики 349
14.4.6. Амперометричні датчики 350
14.4.7. Каталітичні детектори газів 353
14.4.8. Еластомірні хімічні резистори 355
14.5. Складені датчики 356
14.5.1. Теплові датчики 357
14.5.2. Каталітичні датчики Пелістера 358
14.5.3. Оптичні хімічні датчики 358
14.5.4. Гравіметричні детектори 362
14.5.5. Біохімічні датчики 367
Контрольні запитання та завдання 367
Розділ 15. ДАТЧИКИ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 368
15.1. Загальні відомості про радіаційне випромінювання 368
15.2. Одиниці вимірювання в радіаційній фізиці 372
15.3. Детектори радіоактивного випромінювання 382
15.3.1. Сцинтиляційні детектори 383
15.3.2. Іонізаційні детектори 387
15.4. Засоби вимірювання радіації і радіоактивності 398
15.5. Похибки приладів з використанням іонізуючих випромінювань 401
Контрольні запитання та завдання 404
ЛІТЕРАТУРА 405