

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

# **ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ**

## **Підручник**

За редакцією доктора технічних наук, професора Ю.Ф. Павленка

Рекомендовано вченою радою НТУ «ХПІ»

Харків 2017

УДК 389:530.145(075)  
ББК 30.10я7  
В 85

Рецензенти:

*М.Д. Кошовий*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри  
авіаційних приладів та вимірювань, Національний аерокосмічний  
університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»;  
*В.Б. Кононов*, д-р техн. наук, проф., начальник кафедри метрології та  
стандартизації, ХУПС ім. Івана Кожедуба

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ» як  
підручник для студентів вищих навчальних закладів  
лист № 6 від 07.07.2017 р.

Авторський колектив:

Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов, П.І. Неєжмаков,  
Н.М. Маслова, Т.В. Дроздова

**В 85 Вступ до квантової метрології** : підручник / Ю.Ф. Павленко,  
С.І. Кондрашов, П.І. Неєжмаков та ін.; за ред. Ю.Ф. Павленка. –  
Харків : ФОРМ Мезіна В.В., 2017. – 244 с.  
**ISBN 978-617-7577-06-4**

У підручнику суттєво розширено розгляд питань використання квантових методів у реальній метрологічній і виробничій практиці, а також застосування їх у термометрії і фотометрії, яким присвячені окремі розділи. Введено пункти, які пояснюють деякі нові терміни і поняття сучасної метрології, а також ряд важливих додатків.

Призначено для студентів та викладачів вузів, а також фахівців у галузі метрології та вимірювальної техніки.

Іл.114. Табл. 15. Бібліогр.: 57 назв.

УДК 389:530.145(075)  
ББК 30.10я7

**ISBN 978-617-7577-06-4**

© Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов,  
П.І. Неєжмаков, Н.М. Маслова,  
Т.В. Дроздова, 2017

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>3</b>
<b>ПЕРЕДМОВА.....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>

<b>Розділ 1. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Основні поняття і терміни.....	9
1.2. Елементи сучасної фізичної картини світу і квантова метрологія.....	12
1.3. Фізичні ефекти, що використовуються у квантовій метрології.....	14
1.3.1. Квантування і квантова механіка .....	14
1.3.2. Тунелювання електронів .....	15
1.3.3. Надпровідність і ефект Мейснера .....	16
1.3.4. Об'єднання електронів у куперівські пари.....	17
1.4. Макроскопічні квантові ефекти.....	17
1.5. Фундаментальні фізичні сталі .....	18
1.6. SI і квантова метрологія .....	25
Висновки.....	28
Контрольні питання.....	28

<b>Розділ 2. СЕКУНДА: ВІД «АСТРОНОМІЧНОЇ» ДО «КВАНТОВОЇ» СЕКУНДИ .....</b>	<b>30</b>
2.1. Коротка історія.....	30
2.2. Фізичні основи квантових стандартів частоти .....	32
2.3. Молекулярний і рубідієвий стандарти часу-частоти .....	34
2.3.1. Квантовий молекулярний генератор на аміаку .....	34
2.3.2. Рубідієвий стандарт частоти.....	35
2.4. Квантовий стандарт частоти на цезії .....	37
2.5. Квантовий стандарт частоти на атомах водню .....	41
2.6. Первинні еталони одиниць часу і частоти та перспективи їх розвитку .....	44
2.7. Одиниці і шкали часу .....	48
Висновки.....	49
Контрольні питання.....	50

<b>Розділ 3. МЕТР. ВІД АРТЕФАКТУ ДО «СВІТЛОВОГО» МЕТРА .....</b>	<b>51</b>
3.1. Коротка історія.....	51
3.2. Лазер і «світловий» метр.....	53
3.3. Первинний еталон метра.....	54
3.3.1. Еталонне джерело світлового випромінювання .....	54
3.3.2. Система вимірювання частоти лазера .....	57
3.3.3. Система передачі розміру одиниці мірам довжини .....	60
3.4. Первинний еталон одиниці довжини України.....	61
3.5. Перспектива удосконалення – фемтосекундний лазер.....	62
Висновки.....	67
Контрольні питання .....	68

## **Розділ 4. ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА І ЕЛЕКТРИЧНІ**

<b>ВИМІРЮВАННЯ.....</b>	<b>69</b>
4.1. Коротка історія.....	69
4.2. Фізичні основи ефекту Джозефсона .....	72
4.3. Апаратура для відтворення напруги постійного струму на основі ефекту Джозефсона.....	77
4.4. Первинний еталон України.....	80
4.4.1. Структурна схема еталона .....	80
4.4.2. Метрологічні характеристики еталона .....	83
4.5. Відтворення напруги змінного струму на ефекті Джозефсона.....	85
4.5.1. Метод синтезу відліків.....	85
4.5.2. Кодоімпульсний метод.....	86
4.5.3. Метод з використанням частотної модуляції НВЧ-опромінення .....	89
4.5.4. Комбінований (PJVS+JAWS) метод .....	92
4.6. Застосування ефекту Джозефсона у промисловості і приладобудуванні.....	93
4.6.1. Надпровідний квантовий інтерферометричний датчик (НКВІД).....	94
4.6.2. Квантовий вольтметр.....	97
4.6.3. Апаратура Supra VOLT control (Німеччина).....	98
4.6.4. Міст для вимірювання імпедансів на змінному струмі з фундаментальною точністю .....	99
4.6.5. Еталон потужності на промисловій частоті.....	100

4.6.6. Джозефсонівська міра напруги без рідкого гелію.....	100
4.6.7. Міра з використанням високотемпературної надпровідності .....	101
4.6.8. Інші сфери застосування .....	101
Висновки.....	101
Контрольні питання .....	102

## **Розділ 5. КВАНТОВИЙ ЕФЕКТ ХОЛЛА І ВИМІРЮВАННЯ**

<b>ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ .....</b>	<b>104</b>
5.1. Фізичні основи квантового ефекту Холла.....	104
5.2. Міра електричного опору на квантовому ефекті Холла .....	109
5.3. Структурна схема еталона електричного опору на квантовому ефекті Холла .....	115
5.4. Первинний еталон одиниці електричного опору України.....	116
5.5. КЕХ і відтворення параметрів електричних кіл .....	118
5.5.1. Розрахунковий конденсатор .....	119
5.5.2. Відтворення одиниць активного опору і індуктивності за допомогою розрахункового конденсатора .....	121
5.5.3. Відтворення ємності і індуктивності за допомогою холлівської міри опору на постійному струмі .....	122
5.5.4. Використання квантового ефекту Холла на змінному струмі .....	124
5.5.5. Стан в Україні .....	126
5.6. Перспектива розвитку – квантовий ефект Холла на графені .....	127
Висновки.....	128
Контрольні питання .....	129

## **Розділ 6. ЕФЕКТ ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ**

<b>І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИМІРЮВАННЯ .....</b>	<b>130</b>
6.1. Фізичні основи ефекту ЯМР .....	130
6.2. Коротка історія застосування ефекту ЯМР у метрології.....	133
6.3. ЯМР і еталони одиниці магнітної індукції.....	136
6.4. ЯМР і магнітні вимірювання .....	140
6.4.1. Квантові магнітні перетворювачі .....	140
6.4.2. Промисловий ЯМР-тесламетр.....	141
6.5. Інші використання ЯМР: наука, техніка, медицина.....	143

Висновки .....	143
Контрольні питання .....	144

## **Розділ 7. КВАНТОВІ ЕФЕКТИ І НОВА СИСТЕМА**

<b>ЕЛЕКТРИЧНИХ ЕТАЛОНІВ .....</b>	<b>145</b>
7.1. Відтворення ампера на основі квантових ефектів.....	145
7.1.1. Опосередковане відтворення ампера.....	145
7.1.2. Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання.....	148
7.2. Квантові ефекти і вимірювання параметрів інтенсивності .....	151
7.2.1. Еталони змінної напруги і змінного струму .....	151
7.2.2. Еталони одиниці електричної потужності на промисловій і низьких частотах .....	153
7.2.3. Еталони одиниці потужності ВЧ і НВЧ- діапазонів .....	154
7.2.4. Еталони одиниць напруженості електромагнітного поля .....	154
7.3. Нова система відтворення електричних одиниць.....	154
Висновки .....	159
Контрольні питання .....	160

## **Розділ 8. КВАНТОВА МЕТРОЛОГІЯ І ПРИРОДНИЙ ЕТАЛОН**

<b>МАСИ .....</b>	<b>161</b>
8.1. Історія визначення кілограма .....	161
8.2. Типова структура еталона кілограма і еталон України .....	162
8.3. Методи відтворення природного кілограма.....	164
8.3.1. Визначення через сталу Авогадро («атомний» кілограм) .....	164
8.3.2. Визначення через сталу Планка («електричний» кілограм) ..	167
8.4. Умови, які необхідно виконати для перевизначення кілограма .....	169
8.4.1. Забезпечення неперервності вимірювань маси і пов'язаних з нею величин.....	169
8.4.2. Забезпечення поширення перевизначеного кілограма. ....	170
8.5. Одиниця кількості речовини – моль і стала Авогадро.....	173
8.5.1. Передумови і суть перевизначення моля .....	173
8.5.2. Наслідки перевизначення моля .....	174
Висновки .....	174
Контрольні питання .....	176

<b>Розділ 9. КЕЛЬВІН: ШЛЯХ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЧЕРЕЗ ФФС</b> .....	177
9.1. Історія питання.....	177
9.2. Міжнародна температурна шкала МТШ-90.....	181
9.2.1. Контактна термометрія .....	181
9.2.2. Оптична термометрія.....	182
9.2.3. Термометрія в інфрачервоній області спектра .....	183
9.3. Первинні еталони одиниці температури і еталони України.....	185
9.3.1. Еталон у діапазоні низьких температур: 13,803–273,16 К .....	185
9.3.2. Еталон у діапазоні 273,16–1357,77 К.....	185
9.3.3. Еталон у діапазоні 1357,77–2800 К.....	185
9.3.4. Еталон температури в ІЧ-діапазоні 692,64–1234,93 К.....	186
9.4. Шлях до нового визначення кельвіна .....	187
9.4.1. Передумови перевизначення .....	187
9.4.2. Підвищення точності вимірювання сталої Больцмана – необхідна умова перевизначення кельвіна.....	188
9.4.3. Газотермометричні вимірювання.....	189
9.4.4. Шумова термометрія .....	191
9.4.5. Термометрія за доплерівським розширенням лінії .....	192
9.4.6. Останні результати з уточнення сталої Больцмана.....	192
9.5. Наслідки перевизначення. Статус МТШ-90 .....	193
Висновки .....	194
Контрольні питання .....	195

## **Розділ 10. СВІТЛОВІ ВИМІРЮВАННЯ: ВІД СВІЧКИ ДО КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**.....

.....	197
10.1. Із історії світлових (фотометричних) еталонів .....	197
10.2. Еталони одиниці сили світла на основі приймача.....	202
10.2.1. Еталон кандели на основі приймача-радіометра.....	202
10.2.2. Приймач на основі фотодетектора .....	203
10.2.3. Приймач на основі трап-детектора .....	205
10.3. Первинний еталон України одиниці сили світла – кандели .....	206
10.4. Відтворення одиниці світлового потоку – люмена. Еталон України.....	207
10.5. Про перспективу квантового перевизначення світлових одиниць .....	210
Висновки .....	211
Контрольні питання .....	212

<b>Розділ 11. НОВА ВЕРСІЯ SI (NEW SI)</b> .....	213
11.1. Перевизначення одиниць і нова SI.....	213
11.1.1. Явні визначення одиниць.....	214
11.1.2. Визначення через сталі .....	215
11.2. Стан на сьогодні (2017 р.) .....	215
11.3. Аналіз запропонованих визначень основних одиниць .....	217
11.3.1. Секунда, метр, кандела.....	217
11.3.2. Кілограм.....	218
11.3.3. Ампер .....	218
11.3.4. Кельвін .....	219
11.3.5. Моль .....	219
11.4. Наслідки впровадження нової SI.....	219
Висновки.....	222
Контрольні питання .....	223
<b>ПІДСУМКИ</b> .....	224
<b>ДОДАТКИ</b> .....	225
Додаток 1 .....	226
Додаток 2 .....	227
Додаток 3 .....	228
Додаток 4 .....	229
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	232
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	237