

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**Ю.Я. Бобало, Б.А. Мандзій, П.Г. Стахів,  
Л.Д. Писаренко, Ю.І. Якименко**

# **ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ**

Підручник для студентів вищих навчальних закладів

*За редакцією професора Ю.І. Якименка*

*Затверджено Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України*

Київ

Видавництво Національного технічного університету України  
“Київський політехнічний інститут”

ББК 22.33.я73  
УДК 537.212(075.8)  
О-75

*Затверджено Міністерством освіти і науки України  
(лист № 14/18.2 – 2874 від 15.12.05 р.)*

**Рецензенти:**

**Кириленко О.В.**, академік НАН України, д-р техн. наук, професор,  
Інститут електродинаміки НАН України;  
**Жуйков В.Я.**, д-р техн. наук, професор, Національний технічний уні-  
верситет України “Київський політехнічний інститут”;  
**Медиковський М.О.**, д-р техн. наук, професор, Національний університет  
“Львівська політехніка”

**Бобало Ю.Я. та ін.**

О-75 Основи теорії електронних кіл: Підручник (друге видання: доопрацьоване і доповнене) / Ю.Я. Бобало, Б.А. Мандзій, П.Г. Стахів, Л.Д. Писаренко, Ю.І. Якименко; За ред. проф. Ю.І. Якименка. – Київ: Видавництво Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, 2011. – 332 с.

**ISBN 978-966-622-481-4**

Висвітлено основні поняття теорії сигналів, розкрито базові положення теорії електронних кіл, описано їхні компоненти. Значну увагу приділено аналізу електронних кіл, а також перетворенням сигналів в електронних колах.

Видання охоплює всі три види занять з теорії електронних кіл. Кожний розділ закінчується питаннями для самоконтролю, прикладами розв’язання типових задач та задачами для самостійного розв’язування.

Додається електронний підручник, який ґрунтується на двох попередніх виданнях. Він містить три частини, перша з яких значною мірою повторює попередні видання, а дві інші – дають студентів змогу здійснити комп’ютерну самооцінку отриманих знань, а також підготуватись до виконання лабораторних робіт.

Для студентів ВНЗ III – IV рівнів акредитації, які навчаються на базових напрямках “Комп’ютерні науки”, “Мікро- та наноелектроніка”, “Електронні пристрої та системи”, “Оптоелектроніка” тощо і вивчають курс “Основи теорії електронних кіл” або подібні курси.

ББК 22.33.я73

© Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А.,  
Стахів П.Г., Писаренко Л.Д.,  
Якименко Ю.І., 2011

© Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, 2011

ISBN 978-966-622-481-4

## ЗМІСТ

Передмова.....	7
<b>Частина I. Теоретичні основи.....</b>	<b>9</b>
<b>Розділ 1. Основні поняття теорії сигналів.....</b>	<b>9</b>
1.1. Класифікація та способи математичного опису сигналів.....	9
1.2. Аналогові сигнали.....	12
1.2.1. Частотний (спектральний) опис сигналів.....	12
1.2.2. Часовий (динамічний) опис сигналів.....	19
1.2.3. Операторний опис сигналів.....	23
1.3. Дискретизовані та цифрові сигнали.....	25
1.4. Модульовані сигнали та їхнє застосування.....	33
1.4.1. Амплітудно-модульовані сигнали.....	35
1.4.2. Сигнали з кутовою модуляцією (ЧМ- та ФМ-сигнали).....	36
1.4.3. Модуляція імпульсних коливань.....	38
1.5. Стохастичні (випадкові) сигнали.....	40
1.5.1. Числові характеристики випадкових сигналів.....	44
1.5.2. Часово – частотні характеристики випадкового процесу.....	48
1.5.2.1. Спектр Раєвського.....	49
1.5.2.2. Окремі випадки нестационарного ВП.....	58
1.5.2.3. Часово-частотна структура типових моделей дискретних НВП.....	60
Контрольні питання до розділу 1.....	67
Приклади розв’язання типових задач.....	68
Приклади задач для самоконтролю.....	71
<b>Розділ 2. Основні положення теорії електричних кіл.....</b>	<b>73</b>
2.1. Електричне коло.....	73
2.2. Типові двополюсні елементи електричних схем.....	74
2.2.1. Пасивні двополюсні елементи.....	74
2.2.2. Джерела енергії.....	80
2.3. Математичні моделі електричних схем з двополюсниками.....	83
2.3.1. Повна система рівнянь електричної схеми.....	84
2.3.2. Метод вузлових напруг.....	86
2.3.3. Рівняння контурних струмів.....	89
2.4. Багатополюсні елементи електричних схем.....	91
2.5. Особливості формування математичних моделей електричних схем з багатополюсниками.....	95
Контрольні питання до розділу 2.....	97
Приклади розв’язання типових задач.....	98
Приклади задач для самоконтролю.....	101
<b>Розділ 3. Компоненти електронних кіл.....</b>	<b>105</b>
3.1. Напівпровідникові діоди.....	105
3.2. Біполярні транзистори.....	117

3.3. Тиристори .....	123
3.4. Польові транзистори.....	130
3.4.1. Польові транзистори з керуючим р-n-переходом.....	132
3.4.2. МДН-транзистори із вбудованим каналом .....	135
3.4.3. МДН-транзистор з індукованим каналом .....	137
3.5. Електровакуумні лампи.....	139
3.5.1. Електронна емісія. Електровакуумний діод .....	139
3.5.2. Електровакуумний триод .....	142
3.6. Основні відомості про інтегральні мікросхеми.....	144
3.6.1. Класифікація інтегральних мікросхем .....	144
3.6.2. Номенклатура інтегральних мікросхем.....	148
3.6.2.1. Номенклатура аналогових ІМС.....	148
3.6.2.2. Номенклатура та основні параметри цифрових ІМС.....	150
3.7. Моделі компонент електронних кіл .....	152
3.7.1. Схема заміщення напівпровідникового діода .....	152
3.7.2. Моделі біполярного транзистора .....	153
3.7.3. Моделі польових транзисторів.....	158
3.7.4. Моделі електронної лампи (триода) .....	161
Контрольні питання до розділу 3.....	162
Приклади розв'язання типових задач.....	163
Приклади задач для самоконтролю .....	165
<b>Розділ 4. Аналіз електронних кіл .....</b>	<b>166</b>
4.1. Аналіз електричних кіл постійного струму .....	167
4.1.1. Розрахунок лінійних кіл постійного струму .....	167
4.2. Особливості розрахунку нелінійних резистивних кіл .....	169
4.3. Основні характеристики кіл змінного струму.....	177
4.4. Аналіз усталених режимів кіл синусоїдного струму .....	179
4.5. Усталені режими електронних кіл, в яких діють несинусоїдні струми та напруги .....	184
4.6. Аналіз перехідних процесів електронних кіл.....	185
4.6.1. Класичний метод розрахунку.....	186
4.6.2. Операторний метод розрахунку перехідних процесів .....	188
4.6.3. Застосування інтеграла Дюамеля до розрахунку перехідних процесів .....	194
4.6.4. Числові методи розрахунку перехідних процесів електронних кіл.....	197
4.7. Аналіз електронних кіл при стохастичних сигналах .....	201
4.8. Загальна характеристика пакетів програм комп'ютерного аналізу електронних кіл.....	207
Контрольні питання до розділу 4.....	215
Приклади задач для самоконтролю .....	217
<b>Розділ 5. Перетворення сигналів в електронних колах .....</b>	<b>222</b>
5.1. Частотна фільтрація електричних сигналів .....	224
5.1.1. Пасивні фільтри.....	225
5.1.2. Активні RC-фільтри .....	227
5.2. Підсилення сигналів .....	229

5.2.1. Класифікація, основні параметри та характеристики підсилювачів .....	229
5.2.2. Елементарні підсилювальні каскади .....	233
5.2.3. Зворотні зв'язки у підсилювачах .....	238
5.3. Перетворення частоти в нелінійних електронних колах .....	240
5.4. Стабілізація напруги та струму .....	244
5.5. Випрямлення змінного струму .....	250
5.6. Модуляція і детектування .....	255
5.6.1. Принципи побудови перетворювачів спектра .....	255
5.6.2. Амплітудні модулятори .....	258
5.6.3. Частотні і фазові модулятори .....	260
5.6.4. Амплітудні детектори .....	263
5.6.5. Частотні і фазові детектори .....	265
5.7. Генерування гармонічних сигналів .....	268
5.7.1. Основні поняття про принципи побудови автогенераторів .....	268
5.7.2. LC-автогенератори .....	270
5.7.3. RC-автогенератори .....	273
Контрольні питання до розділу 5 .....	277
Приклади розв'язання типових задач .....	278
Приклади задач для самоконтролю .....	279
<b>Розділ 6. Лінійні кола з розподіленими параметрами .....</b>	<b>281</b>
6.1. Вступні зауваження .....	281
6.2. Еквівалентна схема та рівняння довгої лінії .....	282
6.3. Однорідна довга лінія в усталеному режимі гармонічних коливань .....	287
6.3.1. Хвильові параметри довгої лінії .....	287
6.3.2. Розподіл амплітуд напруги та струму вздовж лінії .....	289
6.3.3. Коефіцієнт відбиття лінії .....	293
6.3.4. Усталений режим гармонічних коливань у безвтратній довгій лінії ...	294
6.3.4.1. Режим біжучих хвиль .....	296
6.3.4.2. Режим стоячих хвиль .....	297
6.4. Перехідні процеси в однорідній безвтратній довгій лінії .....	299
Контрольні питання до розділу 6 .....	303
Приклади розв'язання типових задач .....	304
Приклади задач для самоконтролю .....	304
<b>Розділ 7. Дискретні та цифрові електронні кола .....</b>	<b>305</b>
7.1. Дискретні електронні кола .....	305
7.2. Цифрові електронні кола .....	309
7.2.1. Прості логічні схеми .....	310
7.2.2. Елементи пам'яті цифрових схем .....	313
7.3. Цифрові фільтри .....	315
7.3.1. Визначення цифрового фільтра .....	315
7.3.2. Елементи цифрових фільтрів .....	318
7.3.3. Математичний опис цифрових фільтрів .....	319
Контрольні питання до розділу 7 .....	326
Приклади задач для самоконтролю .....	327

<b>Частина II. Самоконтроль рівня отриманих знань .....</b>	<b>328</b>
<b>Процедура самоконтролю.....</b>	<b>328</b>
<b>Частина III. Імітаційне моделювання лабораторних робіт .....</b>	<b>334</b>
<b>Розділ 1. Особливості застосування програмного комплексу OrCAD</b>	
<b>для імітаційного моделювання.....</b>	<b>334</b>
1.1. Підготування лабораторного макета.....	335
1.2. Виконання експерименту .....	337
1.3. Розрахунок схеми, перегляд та оброблення результатів .....	340
<b>Розділ 2. Застосування типових електричних та електронних схем</b>	
<b>у лабораторному практикумі.....</b>	<b>344</b>
2.1. Лабораторна робота № 1. Перехідні процеси у лінійних колах .....	344
2.2. Лабораторна робота № 2. Дослідження резонансу	
у простому коливальному контурі .....	346
2.3. Лабораторна робота № 3. Експериментальне визначення параметрів	
пасивного чотириполюсника.....	349
2.4. Лабораторна робота № 4. Частотні електричні фільтри.....	351
2.5. Лабораторна робота № 5. Прості диференціальні	
й інтегральні RC-ланки .....	353
2.6. Лабораторна робота № 6. Дослідження напівпровідникового тріода.....	356
2.7. Лабораторна робота № 7. Дослідження транзисторних підсилювачів	
низької частоти .....	359
2.8. Лабораторна робота № 8. Дослідження операційних підсилювачів .....	367
2.9. Лабораторна робота № 9. Дослідження роботи RC-генератора	
на операційному підсилювачі.....	369
2.10. Лабораторна робота № 10. Дослідження мультівібратора	
на біполярних транзисторах .....	372
<b>Розділ 3. Розрахунок та синтез рекурсивних цифрових фільтрів</b>	
<b>у лабораторному практикумі.....</b>	<b>374</b>
3.1. Опис програми розрахунку та синтезу РЦФ .....	374
3.2. Приклади лабораторних робіт з розрахунку та синтезу РЦФ.....	387
3.2.1. Лабораторна робота. Фільтр нижніх частот .....	387
3.2.2. Лабораторна робота. Фільтр верхніх частот.....	392
3.2.3. Лабораторна робота. Смуговий фільтр .....	397
3.2.4. Лабораторна робота. Режекторний фільтр .....	403
<b>Список літератури .....</b>	<b>414</b>

## ПЕРЕДМОВА

Цей підручник є четвертим доповненим виданням підручника з аналогічною назвою, що вийшов у 2008 р. Призначений для студентів вищих навчальних закладів України III – IV рівнів акредитації, які навчаються на базових напрямках “Електроніка”, “Комп’ютерна інженерія”, “Комп’ютерні науки”, “Лазерна та оптоелектронна техніка”, “Електронні апарати” і слухають курс “Основи теорії електронних кіл” або подібні за назвою курси.

Як і попередній підручник, він охоплює всі види занять (лекції, практичні та лабораторні заняття) з теорії електронних кіл та уможливує ефективний самоконтроль знань студента. В той же час, на відміну від попереднього видання даний підручник доповнений розділами, які детальніше описують цифрову обробку сигналів, зокрема, з використанням вейвлет-перетворень. Дане видання належить також до класу електронних підручників, що дає змогу застосовувати сучасні технології комп’ютерного навчання, в тому числі і для дистанційного навчання

Структурно підручник містить три частини: теоретичну, практичні завдання із засобами комп’ютерного самоконтролю, лабораторний практикум із засобами імітаційного моделювання. Усі складові подаються, як у текстовій так і в електронній версіях, причому електронні версії не є простими копіями відповідних текстових розділів, а мають форму, яка дає змогу максимально використовувати можливості сучасних комп’ютерів. Зокрема, в електронній версії теоретичної частини містяться основні положення теорії електронних кіл, додатковий довідниковий матеріал з математики та фізики, а також важливі практичні застосування теорії. Електронна версія записана на компакт-диску, який додається до підручника.

Теоретична частина підручника містить матеріал, що стосується основних понять теорії електронних кіл як різновиду електричних кіл. У ній викладено основні методи аналізу таких кіл, зокрема числові методи, орієнтовані на комп’ютерне моделювання електронних кіл. Значна увага приділена описанню функціонування типових компонент електронних кіл. Детальним є розділ, який стосується основ теорії сигналів. Він дає студентам змогу зрозуміти роль сигналів в електроніці та інформатиці, вивчити основні способи їхнього аналізу і перетворень та роль електронних кіл у цих процесах. Окремі розділи підручника містять матеріал, який стосується сучасних методів цифрової обробки сигналів.

Кожний розділ підручника закінчується питаннями для перевірки знань та типовими задачами. Найважливіші висновки по кожному параграфу винесено на поля. Тестові завдання для комп'ютерного самоконтролю знань формуються випадковим чином на основі банку задач різної складності. Реалізовано інтерактивний режим роботи користувача з можливістю підказок, а також надання додаткової інформації. Також у текстовій частині для зручності користувачів поміщено інструкції щодо роботи з електронною версією підручника, подано приклади роботи з програмами самоконтролю знань та виконання імітаційних лабораторних робіт.

Зміст підручника відповідає навчальним програмам відповідних дисциплін, які читаються на вищезазначених базових напрямках. Його обсяг задовольняє вимоги, викладені в останніх нормативних документах Міністерства освіти і науки України.

Навчальний матеріал, викладений у підручнику, автори апробували упродовж багатьох років у навчальному процесі в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” та Національному університеті “Львівська політехніка” на базових напрямках “Електроніка”, “Електронні прилади”, “Лазерна та оптоелектронна техніка”, “Комп'ютерна інженерія”, “Комп'ютерні науки”, “Геодезія, картографія та землеупорядкування”.

Автори висловлюють подяку рецензентам за зауваження та рекомендації, які сприяли поліпшенню змісту підручника.

Автори вдячні за значну допомогу у підготовці рукопису до видання інженеру Самойловій С.Г., к.т.н. Шаховській Н.Б. і к.т.н. Голощуку Р.О. за вагомий внесок у реалізацію електронної версії підручника.

Зауваження та рекомендації стосовно змісту підручника автори просять надсилати на адресу: 79013, Львів–13, вул. С. Бандери, 12, кафедра Теоретичної та загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка”.

Відповідальний редактор  
д.т.н., проф., академік НАН України  
Ю.І. Якименко