

В. І. МІЛИХ, О. О. ШАВЬОЛКІН

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА,
ЕЛЕКТРОНІКА ТА
МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА**

За ред. проф. В.І. Мілих

*Затверджено
Міністерством освіти і науки України
як підручник
для студентів вищих навчальних закладів*

Третє видання

КИЇВ «КАРАВЕЛА» 2018

УДК 621.3:621.38:621.39

М 75

Гриф надано Міністерством
освіти і науки України
(лист №14/18.2-291 від 08.02.2006 р.)

Рецензенти:

М. М. Бабаєв,

д. т. н., професор, УкрДАЗТ;

А. Г. Сосков,

д. т. н., професор, ХНАМГ;

О. І. Яковлєв,

д. т. н., професор, НАУ “ХАІ”

Мілих В. І., Шавьолкін О. О.

М 75 Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред. В. І. Мілих. 3-тє вид. — К.: Каравела, 2018. — 688 с.

ISBN 978-966-8019-85-7

У підручнику викладено навчально-теоретичний матеріал, який супроводжується численними прикладами. Частина з електротехніки описує основні поняття і закони електричних і магнітних кіл, співвідношення електричних і енергетичних величин, які характеризують стан цих кіл. Також розглянуті конструкція, принцип дії, характеристики та принципи управління таких електротехнічних пристроїв, як трансформатори, електровимірвальні прилади, електричні апарати, електричні машини постійного та змінного струму. У частині, що стосується електроніки, подані напівпровідникові прилади (резистори, діоди, транзистори, тиристори, інтегральні мікросхеми, силові напівпровідникові модулі, фото- та оптоелектронні прилади), електронна схемотехніка (випрямлячі та інші перетворювачі, підсилювачі, генератори, ключі, електронна логіка, тригери, генератори імпульсів, типові комбінаційні та послідовнісні пристрої, цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі). З мікропроцесорної техніки подані типові структури мікропроцесора та мікропроцесорної системи, основи програмування мікропроцесорів, організація та функціонування стекової пам'яті та переривань, загальні пристрої пам'яті, організація і функціонування інтерфейсу, мікроконтролери.

Призначений для студентів вищих закладів освіти.

УДК 621.3:621.38:621.39

ISBN 978-966-8019-85-7

© Мілих В. І., Шавьолкін О. О., 2018

© Видавництво «Каравела», 2018

Зміст

ПЕРЕДМОВА.....	11
ВСТУП.....	13
V.1. Базові знання для засвоєння курсу «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка».....	13
V.2. Закони електромагнетизму.....	17
1. ОСНОВИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	22
1.1. Основні поняття про електричні кола.....	22
1.2. Поняття про електричні схеми.....	26
1.3. Ідеальні елементи електричних схем заміщення.....	27
1.4. Параметри реальних об'єктів та приклади електричних схем заміщення.....	33
1.5. Визначення параметрів схем заміщення приймача і джерела електричної енергії в колі постійного струму.....	38
1.6. Структурні поняття електричних кіл.....	41
1.7. Закони Кірхгофа в електричних колах.....	42
1.8. Енергія і потужність в електричних колах.....	44
1.9. Діюче значення періодичного струму.....	46
2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	48
2.1. Загальні зауваження щодо розрахунків електричних кіл.....	48
2.2. Основні розрахункові співвідношення в одноконтурному колі постійного струму.....	49
2.3. Характеристики і режими роботи лінійного джерела електроенергії постійного струму.....	50
2.4. Метод еквівалентних перетворень.....	53
2.5. Метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа.....	58
2.6. Метод контурних струмів.....	60
2.7. Метод еквівалентного генератора.....	64
3. КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ.....	68
3.1. Отримання синусоїдних електричних величин.....	68
3.2. Форми зображення синусоїдних електричних величин.....	69
3.3. Співвідношення напруги і струму на ідеальних елементах схем заміщення.....	75
3.4. Співвідношення напруги і струму на ділянці кола з послідовним з'єднанням ідеальних елементів R, L, C	78
3.5. Співвідношення напруги і струму на ділянці кола з паралельним з'єднанням ідеальних елементів.....	81
3.6. Взаємні перетворення ділянок кола з послідовним і паралельним з'єднанням ідеальних елементів.....	84
3.7. Загальні випадки послідовного і паралельного з'єднання елементів.....	86
3.8. Змішане з'єднання приймачів електроенергії.....	89

3.9.	Потужність у колах синусоїдного струму.....	93
3.9.1.	Потужність на ідеальних елементах.....	93
3.9.2.	Потужність на ділянці кола з послідовним з'єднанням ідеальних елементів R, L, C	95
3.9.3.	Потужності в загальному випадку кола синусоїдного струму.....	97
3.9.4.	Баланс потужності у колах синусоїдного струму.....	98
3.10.	Отримання параметрів схем заміщення пасивного двополюсника.....	99
3.11.	Резонансні явища в колах синусоїдного струму.....	102
3.12.	Основи символічного методу розрахунку кіл синусоїдного струму.....	109
3.13.	Еквівалентні перетворення кіл синусоїдного струму на підставі символічного методу.....	111
3.14.	Загальні принципи використання символічного методу.....	113
3.15.	Комплексна потужність.....	114
3.16.	Моделі електроенергетичної системи та підвищення коефіцієнта потужності.....	117
3.17.	Кола синусоїдного струму з наявністю магнітного зв'язку.....	122
4.	ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА.....	132
4.1.	Отримання трифазної системи ЕРС.....	132
4.2.	Способи з'єднання фаз трифазного джерела. Поняття про лінійні і фазні напруги.....	133
4.3.	Способи включення навантаження у трифазну електричну мережу.....	136
4.4.	Основні розрахункові співвідношення у трифазному навантаженні.....	137
4.4.1.	Схема зірка.....	137
4.4.2.	Схема трикутник.....	140
5.	ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ.....	146
5.1.	Загальне поняття про перехідні процеси і закони комутації.....	146
5.2.	Загальні принципи аналізу перехідних процесів.....	147
5.3.	Приклади аналізу перехідних процесів.....	150
5.3.1.	Вмикання котушки індуктивності до джерела постійної ЕРС.....	150
5.3.2.	Вмикання конденсатора до джерела постійної ЕРС (через резистор).....	152
5.3.3.	Відключення котушки індуктивності від джерела постійної ЕРС з розрядом на резистор.....	153
5.3.4.	Відключення конденсатора від джерела постійної ЕРС з розрядом на резистор.....	155
5.3.5.	Підключення котушки індуктивності до джерела синусоїдної ЕРС.....	156
5.3.6.	Розряд конденсатора на котушку індуктивності.....	158
5.3.7.	Підключення однієї з магнітозв'язаних котушок до джерела постійної ЕРС.....	163

6. НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА.....	168
6.1. Поняття про лінійні і нелінійні електричні кола.....	168
6.2. Принципи розрахунку нелінійних електричних кіл.....	170
6.2.1. Послідовне з'єднання елементів.....	170
6.2.2. Паралельне з'єднання елементів.....	171
6.2.3. Змішане з'єднання елементів.....	171
6.2.4. Розрахунок електричного кола з послідовним з'єднанням лінійного та нелінійного елементів.....	173
7. КОЛА НЕСИНУСОЇДНОГО ПЕРІОДИЧНОГО СТРУМУ.....	175
7.1. Поняття про кола несинусоїдного струму і принципи їхнього розрахунку.....	175
7.2. Приклади розрахунку електричних кіл з періодичними несинусоїдними струмами.....	177
7.3. Загальне уявлення про електричні фільтри.....	180
8. МАГНІТНІ ПОЛЯ І МАГНІТНІ КОЛА.....	186
8.1. Загальне поняття про магнітне поле і магнітні величини.....	186
8.2. Поняття про магніторушійну силу та магнітну напругу.....	188
8.3. Приклади визначення простіших структур магнітного поля.....	189
8.4. Магнітні властивості матеріалів.....	194
8.5. Загальне уявлення про магнітні кола.....	198
8.6. Прояви магнітного поля.....	201
8.7. Закони магнітних кіл.....	204
8.8. Задачі розрахунку магнітних кіл постійного магнітного потоку..	207
8.9. Аналіз стану магнітного кола з постійним магнітом.....	211
8.10. Фізичні процеси в котушці зі сталевим осердям при постійному магнітному потоці.....	212
8.11. Фізичні процеси в котушці зі сталевим осердям при змінному магнітному потоці.....	215
8.12. Співвідношення величин у котушці зі сталевим осердям при змінному магнітному потоці.....	216
8.12.1. Основний магнітний потік.....	217
8.12.2. ЕРС від основного магнітного потоку.....	217
8.12.3. Струм котушки.....	218
8.12.4. ЕРС від магнітного потоку розсіювання.....	220
8.12.5. Рівняння рівноваги напруг і векторна діаграма котушки з сталевим осердям, що включена на синусоїдну напругу....	221
8.13. Потужність і втрати потужності в котушці зі сталевим осердям при змінному магнітному потоці.....	222
8.14. Електрична схема заміщення котушки зі сталевим осердям при змінному магнітному потоці.....	226
8.15. Принципи розрахунку магнітного кола при синусоїдному магнітному потоці.....	228

8.16. Вольтамперна характеристика і повний опір котушки зі сталевим осердям при змінній напрузі.....	231
9. ТРАНСФОРМАТОРИ.....	234
9.1. Призначення і будова трансформатора.....	234
9.2. Принцип дії трансформатора.....	235
9.3. Рівняння напруг в обмотках трансформатора.....	237
9.4. Рівняння струмів в обмотках трансформатора.....	238
9.5. Векторна діаграма напруг і струмів трансформатора.....	240
9.6. Потужності і втрати потужності у трансформаторі.....	241
9.7. Експериментальні дослідження трансформатора і визначення його параметрів і характеристик.....	243
9.7.1. Дослід неробочого ходу.....	243
9.7.2. Дослід короткого замикання.....	244
9.7.3. Дослідження навантаження і експлуатаційні (робочі) характеристики трансформатора.....	245
9.8. Зміна напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора при навантаженні.....	247
9.9. Залежність ККД трансформатора від коефіцієнта струму навантаження.....	248
9.10. Приклади розрахунку параметрів і характеристик трансформатора.....	249
9.11. Класифікація трансформаторів.....	251
9.12. Автотрансформатори.....	254
9.13. Трифазні трансформатори.....	255
9.14. Вимірювальні трансформатори.....	257
10. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ.....	259
10.1. Визначення і класифікація засобів і методів електричних вимірювань.....	259
10.2. Вмикання електровимірювальних приладів і поширення границь вимірювань.....	261
10.3. Похибки приладів та вимірювань.....	263
10.4. Аналогові електромеханічні вимірювальні прилади.....	269
10.4.1. Принципова схема і загальна компоновка конструкції... ..	269
10.4.2. Принцип дії електромеханічних приладів різних систем.....	272
10.5. Електронні вимірювальні прилади.....	275
10.5.1. Загальне поняття про цифрові прилади.....	275
10.5.2. Електронні вольтметри.....	276
10.5.3. Індикатор напруги та давач струму.....	277
10.5.4. Реєстратори і самописці.....	279
10.5.5. Осцилографи.....	280
10.5.6. Мікропроцесорний лічильник електроенергії.....	284
10.6. Приклади організації електричних вимірювань.....	287

10.6.1.	Вимірювання електричних опорів постійного струму.....	287
10.6.2.	Вимірювання активної потужності в трифазних колах....	289
10.6.3.	Вимірювання електричної енергії.....	291
10.7.	Електричні методи вимірювання неелектричних величин.....	292
10.7.1.	Основні поняття і визначення.....	292
10.7.2.	Методи вимірювання магнітних величин.....	293
10.7.3.	Вимірювання лінійних переміщень і товщини.....	295
10.7.4.	Вимірювання механічних навантажень та тиску.....	296
10.7.5.	Вимірювання частоти обертання.....	297
10.7.6.	Вимірювання температури.....	299
11.	ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ.....	301
11.1.	Загальне поняття про електричні апарати.....	301
11.2.	Приклад використання електричних апаратів.....	302
11.3.	Узагальнена структура електричного апарата.....	303
11.4.	Силовий електромагнітний механізм.....	304
11.5.	Контакти комутуючі і проблема дугогасіння.....	305
11.6.	Комутаційні апарати.....	307
11.7.	Реле: загальне уявлення.....	314
11.8.	Приклади конструкції і принципу дії реле.....	316
11.9.	Запобіжники.....	319
12.	ЗАГАЛЬНЕ УЯВЛЕННЯ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.....	323
12.1.	Вихідні визначення.....	323
12.2.	Електрична машина як узагальнений конструктивний модуль....	325
12.3.	Магнітні поля в електричних машинах.....	329
12.4.	Створення обертового магнітного поля.....	331
12.5.	Приклади магнітних полів в електричних машинах.....	335
12.6.	Поняття про реакцію якоря.....	337
12.7.	Основи принципу дії електричних машин.....	339
12.8.	Зауваження щодо застосування законів електромагнітної індукції і Ампера.....	342
12.9.	Потужності і втрати потужності в електричних машинах.....	344
12.10.	Головні розміри і параметри електричних машин.....	346
13.	ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	349
13.1.	Загальні визначення.....	349
13.2.	Конструкція машини постійного струму.....	350
13.3.	Основи принципу дії МПС.....	354
13.3.1.	Модель МПС.....	354
13.3.2.	ЕРС в обмотці якоря МПС.....	357
13.3.3.	Обертальний електромагнітний момент.....	360
13.4.	Генераторний режим роботи МПС.....	362
13.5.	Двигунний режим роботи МПС.....	364

13.6. Потужності і втрати потужності в МПС.....	366
13.7. Класифікація машин за способом збудження.....	368
13.8. Характеристики генераторів постійного струму.....	369
13.9. Робота МПС як двигуна.....	372
13.9.1. Вихідні положення.....	372
13.9.2. Способи пуску ДПС.....	373
13.9.3. Властивість саморегулювання ДПС.....	374
13.9.4. Електромеханічна (швидкісна) характеристика ДПС.....	375
13.9.5. Механічна характеристика ДПС.....	375
13.9.6. Робочі (експлуатаційні) характеристики ДПС.....	377
13.9.7. Способи регулювання частоти обертання ДПС.....	378
13.9.8. Способи електричного гальмування ДПС.....	381
13.10. Особливості ДПС з іншими схемами збудження.....	384
13.11. Приклади розрахунку параметрів і характеристик ДПС.....	386
13.11.1. Параметри і характеристики ДПС з паралельним і незалежним збудженням.....	386
13.11.2. Параметри і характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням.....	390
14. ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ.....	396
14.1. Загальні поняття.....	396
14.2. Будова трифазного асинхронного двигуна.....	397
14.3. Схеми обмотки статора.....	402
14.4. Принцип дії трифазного асинхронного двигуна.....	403
14.5. Електромагнітний момент у ТАД.....	406
14.6. Рівняння напруг і струмів в обмотках ТАД.....	411
14.7. Потужності і втрати потужності в ТАД.....	414
14.8. Механічна характеристика ТАД.....	416
14.9. Визначення механічної характеристики ТАД за його паспортними даними.....	418
14.10. Робота ТАД і керування ним.....	421
14.10.1. Пуск і способи пуску ТАД.....	421
14.10.2. Властивість саморегулювання ТАД.....	424
14.10.3. Робочі (експлуатаційні) характеристики ТАД.....	425
14.10.4. Регулювання частоти обертання ТАД.....	426
14.10.5. Електричне гальмування і реверсування ТАД.....	430
14.11. Приклади розрахунку параметрів і характеристик ТАД.....	433
15. ТРИФАЗНІ СИНХРОННІ МАШИНИ.....	442
15.1. Загальні поняття.....	442
15.2. Будова трифазної синхронної машини.....	444
15.3. Робота трифазної синхронної машини в режимі генератора.....	448
15.4. Рівняння електричного стану, схема заміщення і векторна діаграма синхронного генератора.....	451

15.5. Робота трифазної синхронної машини в режимі двигуна.....	454
15.6. Рівняння електричного стану, схема заміщення і векторна діаграма синхронного двигуна та синхронного компенсатора.....	457
15.7. Потужності й обертальний момент синхронної машини.....	459
15.8. Приклади розрахунку параметрів і характеристик синхронних машин.....	462
16. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ	473
16.1. Предмет електроніки.....	473
16.2. Напівпровідники та їхні властивості.....	474
16.3. Напівпровідникові резистори.....	481
16.4. Напівпровідникові діоди.....	483
16.5. Транзистори.....	488
16.5.1. Біполярні транзистори.....	489
16.5.2. Польові транзистори.....	493
16.5.3. Біполярні транзистори з ізольованим затвором.....	497
16.6. Тиристори.....	498
16.7. Інтегральні мікросхеми.....	502
16.8. Силлові напівпровідникові модулі.....	505
16.9. Фотоелектронні прилади та тлумачення про оптоелектроніку.....	506
17. ВИПРЯМЛЯЧІ І ПРИСТРОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....	514
17.1. Загальні визначення.....	514
17.2. Однофазні схеми випрямлення.....	517
17.3. Трифазні випрямлячі.....	521
17.4. Згладжувальні фільтри.....	525
17.5. Стабілізатор постійної напруги.....	527
17.6. Керовані випрямлячі.....	528
17.7. Перетворювачі напруги.....	536
17.7.1. Регулятор змінної напруги.....	536
17.7.2. Імпульсні перетворювачі постійного струму, що знижують напругу.....	537
17.7.3. Імпульсний перетворювач постійного струму, що підвищує напругу.....	539
17.8. Автономні інвертори.....	541
17.9. Перетворювачі частоти.....	547
17.10. Тлумачення про принципи побудови систем керування тиристорними перетворювачами.....	548
18. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ ТА ГЕНЕРАТОРИ.....	553
18.1. Призначення й основні параметри підсилювачів.....	553
18.2. Зворотні зв'язки в підсилювачах.....	555
18.3. Підсилювачі змінного струму.....	557
18.4. Підсилювачі постійного струму. Операційний підсилювач.....	561
18.4.1. Диференційний каскад.....	562
18.4.2. Операційний підсилювач.....	564

18.5. Вибіркові підсилювачі. Резонансні фільтри.....	571
18.6. Електронні генератори та імпульсні пристрої.....	573
19. ДИСКРЕТНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ.....	581
19.1. Імпульсні напруги і струми.....	581
19.2. Ключовий транзисторний підсилювач.....	583
19.3. Основні операції над логічними змінними та їхня реалізація.....	585
19.3.1. Основні поняття з алгебри логіки.....	585
19.3.2. Основні логічні операції.....	586
19.4. Тригери. Розподілення на комбінаційні і послідовнісні пристрої.....	590
19.5. Генератори імпульсів.....	595
19.6. Подання чисел у цифрових пристроях.....	597
19.7. Типові комбінаційні пристрої.....	601
19.8. Типові послідовнісні пристрої.....	604
19.9. Цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі.....	608
20. МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА.....	611
20.1. Структурна схема мікропроцесора.....	612
20.2. Типова структура мікропроцесорної системи.....	617
20.3. Основи програмування мікропроцесорів.....	620
20.3.1. Вступ у програмування.....	620
20.3.2. Основні типи команд і їхнє застосування.....	623
20.3.3. Особливості укладання програм на мові Асемблер.....	627
20.3.4. Приклад укладання програми для МП КР580ВМ80.....	632
20.4. Організація та функціонування стекової пам'яті та переривань..	633
20.5. Пристрої пам'яті.....	635
20.5.1. Побудова і функціонування ОЗП.....	636
20.5.2. Побудова і функціонування ПЗП.....	637
20.6. Організація і функціонування інтерфейсу.....	638
20.7. Мікроконтролери.....	641
20.7.1. Види архітектури МПС.....	641
20.7.2. Структура мікроконтролерів типу PIC16F87X.....	643
20.7.3. Основні внутрішні периферійні пристрої.....	648
20.7.4. Основні типи команд та особливості програмування.....	653
20.7.5. Приклад програмування мікроконтролера PIC16F87X....	662
20.8. Програмовані промислові логічні контролери.....	670
20.8.1. Особливості використання та характеристики.....	671
20.8.2. Особливості програмування.....	672
20.8.3. Приклад використання контролера типу ALPHA для автоматизації технологічного об'єкта.....	675
20.8.4. Застосування програмованих логічних контролерів у системах автоматизації технологічних об'єктів.....	677
20.8.5. Приклади сучасних контролерів.....	681
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	685