

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» 2016

УДК 621.3:621.38:621.39
ББК 31.2+32.85+32.973.26-04я73
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. Яковлев,

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, 2016. — 688 с.

ISBN 978-966-801-985-7

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, електровимірювальні 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 навчальних закладів.

УДК 621.3:621.38:621.39
ББК 31.2+32.85+32.973.26-04я73

ISBN 978-966-801-985-7

© Мілих В.І., Шавьолкін О.О., 2016
© Видавництво «Каравела», 2016

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 зі 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. Тиристри	498
16.7. Інтегральні мікросхеми	502
16.8. Силові 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

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» поєднує три зазначені складові, які відповідають певним галузям науки і техніки. *Електротехніка* вивчає практичне використання електромагнітних явищ. *Електроніка* вивчає використання електронних і йонних процесів, тобто процесів перетворення концентрації та пересування зарядів у різних середовищах. *Мікропроцесорна техніка* є вершиною розвитку електроніки і базується на вивченні та використанні створених в процесі розвитку мікроелектроніки і обчислювальної техніки спеціалізованих програмованих великих інтегральних мікросхем – мікропроцесорів, які спричинили якісний стрибок у створенні контролюючих, керуючих і обробляючих систем мікро-ЕОМ, що безпосередньо вбудовуються в прилади, машини і технологічне устаткування.

Частина з електротехніки присвячена викладанню теоретичного матеріалу щодо основних понять і законів електричних кіл, співвідношень електричних і енергетичних величин, які характеризують стан цих кіл, принципів їхніх розрахунків та ін. Теж саме подається стосовно магнітних кіл. Значний обсяг матеріалу присвячений вивченню конструкції, принципу дії, характеристик і принципів керування таких електротехнічних пристроїв, як трансформатори, електровимірювальні прилади, електричні апарати, електричні машини постійного і 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, комбінаційні та послідовнісні пристрої, цифро-аналогові й аналого-цифрові перетворювачі та ін.).

З мікропроцесорної техніки подані типові структури мікропроцесора та мікропроцесорної системи, основи програмування мікропроцесорів, організація і функціонування стекової пам'яті та переривань, пристрої пам'яті, організація і функціонування інтерфейсу, мікроконтролери тощо.

У випадках, коли за програмою дисципліни передбачено проведення розрахунків, матеріал супроводжується прикладами.

Перелічені частини курсу мають для майбутнього інженера самостійне значення, але кожна попередня з них є основою для вивчення наступних частин, а також інших навчальних дисциплін

як електротехнічного, так і неелектротехнічного спрямування. Адже, з одного боку, електричні кола є невід'ємною складовою систем електроживлення виробничого, транспортного, дослідного і побутового призначення. З іншого боку, ці кола, як і магнітні кола, є складовими частинами більшості електротехнічних пристроїв, таких як трансформатори, електричні апарати і машини, електровимірювальні прилади, а також спільно з напівпровідниковими приладами є складовими різноманітних електронних пристроїв, аж до пристроїв мікропроцесорної техніки і комп'ютерів. У свою чергу, електронна техніка є невід'ємною частиною сучасних систем живлення та керування згаданих електротехнічних пристроїв та багатьох виробничих процесів. Тому освоєння всієї цієї техніки є необхідною умовою успішної професійної діяльності як безпосередньо інженерів і дослідників електротехнічного профілю, так й інженерів інших технічних спеціальностей, таких як інженери-механіки машинобудівної, металургійної, хімічної, транспортної та інших галузей.

Пропонований підручник перш за все орієнтований на студентів неелектротехнічних спеціальностей при вивченні ними дисциплін *загального електротехнічного профілю* та інших спеціалізованих дисциплін такого роду. Сподіваємось, підручник також буде вельми корисним для студентів та викладачів електротехнічних спеціальностей. Дійсно, кількість і обсяг спеціальної електротехнічної літератури, як і відповідних дисциплін, дуже великі. І в кожному спеціалізованому виданні автори намагаються зібрати всю попередню і нову всеохоплюючу теорію, добре насиченою складною математикою. Це корисно для фахівця, який вже сформувався й має досвід роботи. Але тому, хто проходить курс навчання уперше, будуть зручними саме ті обсяги та стиль подання матеріалу, притаманні загальним електротехніці та електроніці. Перш за все це стосується таких дисциплін, як, наприклад, *вступ до спеціальності*, орієнтованих на майбутніх електриків, електромеханіків, електроніків, фахівців з електропобутової техніки тощо.

У підсумку можна зауважити, що за обсягом і змістом матеріалу підручник орієнтований більшою мірою на широке коло фахівців, які є або будуть користувачами електротехнічних та електронних пристроїв, і меншою – на розробників подібної техніки.

Даний підручник певною мірою узагальнює досвід викладання курсу «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» та споріднених до нього дисциплін в НТУ «ХП» (м.Харків) та в ДонНТУ (м.Донецьк). Тому автори вдячні колегам, причетним до розвитку і вдосконалення методики викладання цього курсу.

ВСТУП

В.1. Базові знання для засвоєння курсу «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка»

Вивчення дисципліни «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» базується на знанні наступних основ, що вивчаються в курсах фізики і математики:

1) поняття про електричні, магнітні, енергетичні і механічні величини та одиниці їхнього вимірювання: заряд [Кл], потенціал [В], струм і сила струму [А], напруга [В], електрорушійна сила (ЕРС) [В], опір [Ом] і провідність [См], магнітні потік [Вб] і індукція [Тл], напруженість магнітного поля [А/м], час [с], швидкість [м/с], частота [Гц] і кутова частота [s^{-1}], кутова швидкість [рад/с] і частота обертання [об/с, об/хв], електричні, а також інші види енергії [Дж] і потужності [Вт], сила [Н], обертальний момент [Н·м] та ін.;

2) закони електромагнетизму: закон Кулона, закон Ома, закон Джоуля-Ленца, закони Кірхгофа, закон Біо-Савара-Лапласа, закон повного струму, закон електромагнітної індукції, правило Ленца, закон Ампера;

3) фізичні основи: електромагнітні процеси в провідникових, напівпровідникових та інших середовищах;

4) математичні основи: диференціювання й інтегрування елементарних функцій, операції з тригонометричними функціями, розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь, дії з векторами і комплексними числами та ін.

Основою всіх електромагнітних явищ є електромагнітне поле та електричний заряд.

Електромагнітне поле — особливий вид матерії, який у всіх точках простору поєднує дві його складові, що називаються, відповідно, *електричне* та *магнітне поля*. Електромагнітне поле проявляється силовою дією на електрично заряджені частинки, але природа цього поля і власне заряду є феноменами, не пізнаними до кінця. У загальному випадку силова дія електромагнітного поля виражається силою Лоренца: $\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{V} \times \vec{B}]$ або $\vec{F}_L = \vec{F}_E + \vec{F}_M$, де використані позначення величин, суть яких подається нижче.

Електричний заряд q — джерело електромагнітного поля, яке пов'язане з матеріальним носієм; елементарний електричний заряд — це внутрішній параметр елементарної частинки, що визначає її електромагнітну сутність, здатність до взаємодій. Уся сукупність електричних і магнітних явищ є проявом існування, руху і взаємодії електричних зарядів. Розрізняють два види електричних зарядів, які умовно називають позитивними «+» та негативними «-». Останні названі на честь електрона — елементарної негативно зарядженої частинки, заряд електрона $e = 1,601 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Електричне поле — одна із складових електромагнітного поля, яка виявляється у дії на електрично заряджену частинку із силою \vec{F}_E , пропорційною зарядові частинки q і незалежною від швидкості її руху. Це поле характеризується векторною величиною — напруженістю електричного поля \vec{E} . Чисельно ця величина дорівнює відношенню сили, що діє на заряджену частинку, до її заряду і має напрямок сили, що діє на частинку з позитивним зарядом, тобто $\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_E}{q}$.

Магнітне поле — інша складова електромагнітного поля, яка виявляється у дії на рухому електрично заряджену частинку із силою \vec{F}_M , пропорційною зарядові частинки q і швидкості її руху V . Це поле характеризується векторними величинами: напруженістю магнітного поля \vec{H} і пов'язаною з нею магнітною індукцією \vec{B} . Чисельно магнітна індукція дорівнює відношенню сили F_M до добутку заряду q і швидкості V частинки, тобто $B = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F_{M \max}}{q \cdot V}$,

якщо напрямок швидкості такий, що ця сила максимальна. Вектор магнітної індукції перпендикулярний до векторів сили \vec{F}_M і швидкості \vec{V} , а його напрямок при цьому збігається з поступовим переміщенням правого гвинта при його обертанні від напрямку сили до напрямку швидкості частинки із позитивним зарядом. У підсумку перелічені величини поєднує формула $\vec{F}_M = q[\vec{V} \times \vec{B}]$.

У природному стані різні матеріальні тіла є електрично нейтральними, тобто елементарні позитивні та негативні заряди рівномірно розподілені в їхньому об'ємі і врівноважують один одного. Щоб вивільнити заряди різних знаків і примусити їх рухатися в заданому напрямку, треба витратити енергію. Сили, які розділяють

заряди різних знаків, долаючи електростатичні сили тяжіння між ними, називаються сторонніми. Походження *сторонніх сил* може бути різним: в електромеханічних генераторах це механічні сили, що передаються через вихрове електричне поле, яке виникає при зміні магнітного поля з часом, або це сили Лоренса, які діють з боку магнітного поля на електрони в провіднику, який рухається; в гальванічних елементах — це хімічні сили; сторонні сили можуть бути безпосереднім проявом теплових процесів, механічного тиску, контактних явищ між різними матеріалами тощо.

Для опису електромагнітних полів і процесів введено цілий ряд формальних фізичних величин. Поряд зі вже згаданими величинами виняткову роль мають також наступні електричні величини.

Електричний струм — це впорядкований (направлений) рух електрично заряджених частинок. За напрямком струму приймають напрямок руху позитивно заряджених частинок. Якщо струм створюється негативно зарядженими частинками (наприклад, електронами), то напрямком струму вважають протилежним напрямку їхнього руху. Кількісно електричний струм характеризується скалярною величиною — силою струму I і векторною величиною — густиною електричного струму \vec{j} . *Сила струму* дорівнює відношенню абсолютного значення електричного заряду dq , який проходить за малий проміжок часу dt крізь визначену поверхню (наприклад, крізь поперечний переріз провідника), до значення dt , тобто $I = dq/dt$.

Для опису потенціальної енергетичної здатності електричного поля слугує скалярна величина — *електричний потенціал* ϕ . Потенціал даної точки поля є відношенням роботи A , яку може виконати поле, переміщуючи заряд q із даної точки в нескінченно віддалену точку, до самого заряду, тобто $\phi = A/q$. Нескінченно віддалену точку беруть там, де електричне поле відсутнє і де, отже, потенціал дорівнює нулю.

Електрична напруга — це скалярна величина, яка є порідненою до потенціалу. Вона введена для енергетичної характеристики електричного поля або електричного кола і вона характеризує здатність поля виконувати роботу при переміщенні заряджених частинок між точками простору. Електрична напруга між двома точками електричного кола або електричного поля чисельно дорівнює роботі електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду із точки a в точку b . У загальному випадку

напруга дорівнює відношенню роботи A , яку виконує поле, переміщуючи заряд q із даної точки в іншу точку, до самого заряду, тобто $U_{ab} = A/q$. У потенціальному електричному полі (електростатичне поле) ця робота не залежить від шляху переміщення заряду. У такому разі електрична напруга між двома точками дорівнює різниці потенціалів між ними, тобто $U_{ab} = \Phi_a - \Phi_b$.

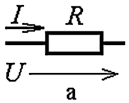
Електрорушійна сила (ЕРС) — це скалярна величина, яка характеризує дію сторонніх сил у джерелах постійного або змінного струму. Сторонні сили приводять до руху електричні заряди всередині генераторів, гальванічних елементів та інших джерел струму. ЕРС E (тут E не треба плутати з позначенням напруженості електричного поля) чисельно дорівнює роботі, яка виконується силами стороннього електричного поля (неелектростатичного) при перенесенні уздовж замкненого контура електричного кола одиниці позитивного електричного заряду, або, в загальному випадку, ЕРС дорівнює відношенню роботи A , яку виконують сторонні сили, переміщуючи заряд q уздовж замкненого провідникового контура, до самого заряду, тобто $E = A/q$. З іншого боку ЕРС джерела напруги дорівнює різниці потенціалів або напрузі на його електродах (полюсах) при розімкненому зовнішньому колі, тобто при відсутності електричного струму в джерелі.

Визначення та позначення магнітних та електричних величин регламентуються стандартами різного рівня. Так, у межах України такі державні стандарти, як: «ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення»; «ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення»; «ДСТУ 3120-95. Електротехніка. Літерні позначення основних величин», можна вважати загальними для галузі електротехніки. Але, на жаль, ці стандарти не є досконалими, тому в навчально-методичній літературі зараз ще застосовуються визначення і позначення, які відрізняються від стандартизованих. Усього в галузі електротехніки та за окремими її напрямками існують десятки різних стандартів, яких треба дотримуватися.

Взаємодія та взаємовідношення величин, що описують електромагнітні процеси в електротехнічних пристроях, регулюється законами електромагнетизму. Зважаючи на те, що в даному підручнику регулярно доводиться посилається на ці закони, наведемо їх у формі, в якій ними прийнято оперувати в курсі «Електротехніка,

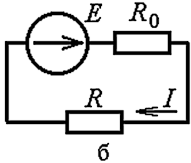
електроніка та мікропроцесорна техніка». При цьому зауважимо, що закони формулюються, головним чином, стосовно поняття постійного струму, як це прийнято в курсі фізики. У подальшому ці закони отримують і більш поширене тлумачення.

В.2. Закони електромагнетизму



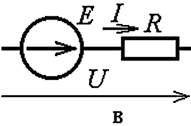
В.2.1. **Закон Ома** (рис. В.1) має такі варіанти:
 а) сила струму I прямо пропорційна напрузі U і обернено пропорційна електричному опору R ділянки кола:

$$I = \frac{U}{R}; \tag{В.1}$$



б) сила струму в електричному колі прямо пропорційна ЕРС джерела електроенергії й обернено пропорційна сумі електричних опорів зовнішньої і внутрішньої ділянок:

$$I = \frac{E}{R + R_0}; \tag{В.2}$$



в) узагальнений закон Ома для ділянки кола (знак « \leftrightarrow » у разі зміни напрямку напруги):

$$I = \frac{E \pm U}{R}. \tag{В.3}$$

Рис. В.1. Ілюстрація до закону Ома

В.2.2. Закони Кірхгофа:

1 закон — алгебраїчна сума струмів віток, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю, тобто:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0, \tag{В.4}$$

де m — кількість віток у даному вузлі.

Або, наприклад, обираючи напрямок до вузла позитивним, маємо для випадку на рис. В.2:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0.$$

2 закон — алгебраїчна сума спадів напруг у вітках замкненого контура електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що знаходяться в цьому контурі, тобто:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^q E_k, \tag{В.5}$$

де n, q — кількості пасивних елементів і джерел ЕРС у цьому контурі.

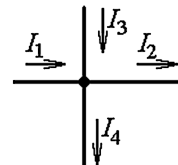


Рис. В.2. Вузол електричного кола

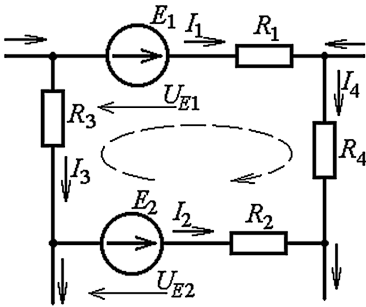


Рис. В.3. Контур електричного кола

Або, для прикладу, обираючи вказаний на рис. В.3 напрямок обходу:

$$I_1 R_1 + I_4 R_4 - I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_1 - E_2.$$

В.2.3. Закон Джоуля-Ленца: теплова енергія, що виділяється в провіднику (наприклад, у резисторі, як на рис. В.1,а), дорівнює добутку квадрата сили струму I , опору провідника R і часу t , а саме:

$$W_T = I^2 R t. \tag{В.6}$$

В.2.4. Закон Біо-Савара-Лапласа: індукція $d\vec{B}$ магнітного поля, що створюється елементом струму $I d\vec{l}$ на відстані r від нього в однорідному середовищі з відносною магнітною проникністю μ_r (рис. В.4), обернено пропорційна квадрату відстані і прямо пропорційна елементу струму і синусу кута β поміж векторами $d\vec{l}$ і r , тобто у векторній, а потім і в скалярній формах:

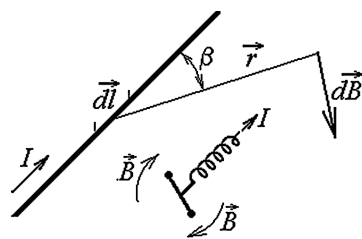


Рис. В.4. Магнітна індукція від провідника зі струмом

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi r^3} [I d\vec{l} \times \vec{r}]; \quad dB = \frac{\mu_0 \mu_r I dl}{4\pi r^2} \sin \beta, \tag{В.7}$$

де $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнітна стала.

Напрямок вектора магнітної індукції визначається відомим правилом буравчика, як показано на рис. В.4.

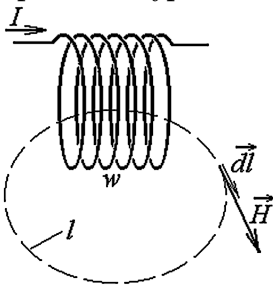


Рис. В.5. Контур, зчеплений з катушкою

В.2.5. Закон повного струму: циркуляція вектора напруженості H магнітного поля по контуру l (рис. В.5) дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що охоплюються цим контуром:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I, \tag{В.8}$$

де повний струм $\sum I = wI$, w — кількість витків катушки, по котрій проходить струм I .

В.2.6. Закон електромагнітної індукції: ЕРС e , яка індукується в провідниковому контурі або котушці (рис. В.6), дорівнює швидкості зміни його магнітного потокозчеплення Ψ :

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (\text{В.9})$$

де $\Psi = \sum_{k=1}^w \Phi_k$; w – кількість витків котушки; Φ_k – магнітний потік, який пронизує її k -ий виток.

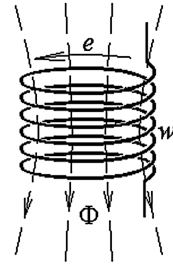


Рис. В.6. Котушка у магнітному полі

У частковому випадку, коли всі витки пронизуються однаковим магнітним потоком, $\Psi = w\Phi$, і тоді ЕРС:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt}. \quad (\text{В.10})$$

При іншому формулюванні закону для елемента dl **провідника, який переміщується зі швидкістю V в магнітному полі з індукцією B** (рис. В.7) ЕРС має вигляд:

$$dE = \vec{B}[d\vec{l} \times \vec{V}]. \quad (\text{В.11})$$

Якщо при цьому **магнітне поле однорідне**, тобто індукція B скрізь однакова за величиною і напрямком, ЕРС на всю довжину l провідника:

$$E = VB\sin\alpha. \quad (\text{В.12})$$

Напрямок ЕРС визначається **правилом правої руки** (рис. В.7).

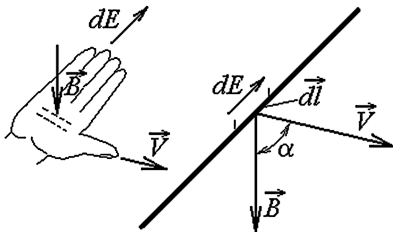


Рис. В.7. Провідник, що рухається в магнітному полі

В.2.7. Закон Ампера (рис. В.8) виражає силу Ампера:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}], \quad (\text{В.13})$$

котра діє на елемент довжини dl провідника зі струмом I , який розташовується в магнітному полі з індукцією B .

У простішому випадку, при однорідному магнітному полі на всю довжину l провідника діє сила Ампера:

$$F_A = IBl\sin\alpha. \quad (\text{В.14})$$

Напрямок сили Ампера визначає **правило лівої руки** (рис. В.8).

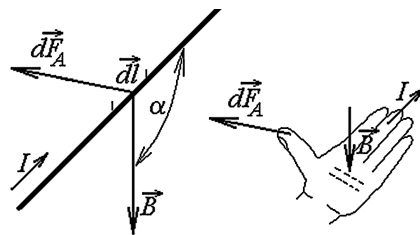


Рис. В.8. Провідник зі струмом у магнітному полі

В.2.8. Правило Ленца: індукційний струм i , який виникає у замкненому контурі, має такий напрямок, що створений ним магнітний потік крізь площу, обмежену контуром, прагне компенсувати ту зміну потоку, яким викликається даний струм.

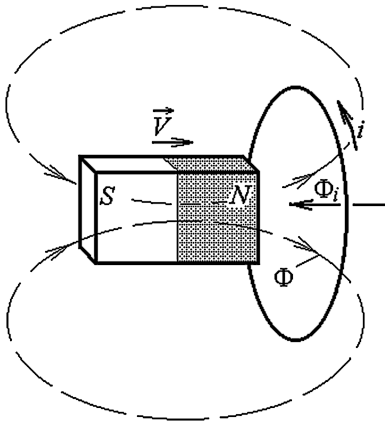


Рис. В.9. Внесення магніта у провідниковий контур

На рис. В.9 як окрема ілюстрація правила Ленца вказано напрямок потоку Φ_i магнітного поля, що збуджується струмом i , який, у свою чергу, індукований магнітним потоком Φ постійного магніту, який вноситься в контур.

Відомо, що правило Ленца безпосередньо торкається закону електромагнітної індукції, визначаючи напрямок індукованої ЕРС, як і напрямок струму, що нею викликається.

В.2.9. Закон Кулона визначає силу взаємодії вільних електричних зарядів: двоє точкових зарядів, що знаходяться в однорідному діелектрику з відносною діелектричною проникністю ϵ_r , взаємодіють один з одним із силою F_k , яка пропорційна добутку зарядів q_1 і q_2 та обернено пропорційна квадрату відстані r між ними (рис. В.10):

$$F_k = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2}, \quad (\text{В.15})$$

де $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична стала.

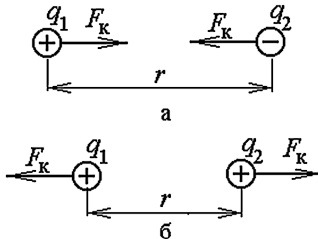


Рис. В.10. Взаємодія електричних зарядів

Сила спрямована по лінії, яка з'єднує заряди, і відповідає притягненню для різнойменних зарядів (рис. В.10, а) і відштовхуванню для однойменних (рис. В.10, б).

На завершення запропонуємо емблему-символ електротехніки (рис. В.11). У цій алегорії виявляються основи електротехніки. У центрі знаходиться птах Electrical Engineering — Електротехніка, що летить зі швидкістю V в магнітному полі, яке характеризується індукцією B . Відповідно до закону електромагнітної індукції в крилах птаха виникає ЕРС E . Коли крила торкнулись провідникового

кільця Electrical Engineering, то під дією ЕРС в контурі, що утворився, з'явиться струм I . І у відповідності із законом Ампера взаємодія струму з магнітним полем приводить до виникнення сили F . Напрямки всіх величин на емблемі відповідають загально-відомим встановленим правилам.

На явищах, згаданих вище, побудовано принцип дії більшості електротехнічних пристроїв, тільки в різних випадках змінюється послідовність логічного ланцюжка їхніх взаємозв'язків: одні величини стають первинними, а інші — вторинними.

Із відкриттям законів електромагнетизму в XIX столітті почалася ера Електротехніки — практичного використання відповідних явищ. І з того часу птах — Electrical Engineering став приносити і буде завжди приносити людям щастя, що символізують проміння, які виходять із Electrical Engineering, адже Електротехніка, окрім всього іншого, дає і світло, і тепло. І щоб повністю це усвідомити, належить пізнати науку під загальною назвою ЕЛЕКТРОТЕХНІКА.

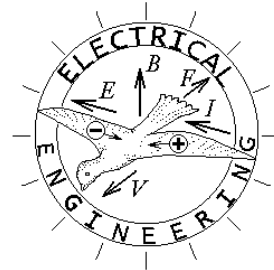


Рис. В.11. Емблема-символ електротехніки

Запитання для самоконтролю

1. Які види електричного заряду Вам відомі?
2. Які сили можуть приводити до розділення зарядів різних знаків?
3. Що таке електромагнітне поле і як проявляються його складові — електричне та магнітне поля?
4. Поясніть поняття ЕРС і електричного струму, потенціалу і напруги.
5. Що є спільного у поняттях електричного потенціалу і напруги та чим вони відрізняються?
6. У якому випадку значення ЕРС та напруги співпадають?
7. Назвіть закони, які описують електричні та магнітні процеси.
8. Сформулюйте відомі Вам закони електромагнетизму.
9. Які закони пов'язують електричні та магнітні величини?
10. Що треба змінити у електричному контурі або на ділянці електричного кола, щоб збільшити або зменшити електричний струм?
11. Що треба зробити, щоб створити у оточуючому просторі магнітне поле? Як можна змінювати напруженість та індукцію цього поля?
12. Що треба зробити, щоб у провіднику або котушці виникла ЕРС?
13. Які умови треба забезпечити, щоб на провідник діяла сила?
14. Які документи регламентують поняття та терміни електротехніки?