

ВСТУП

Курс “Теоретичні основи електротехніки” (ТОЕ) є одним з основних курсів, які вивчаються студентами вищих навчальних закладів електротехнічного профілю.

Предметом курсу ТОЕ є вивчення електромагнітних процесів в електричних колах і полях в загальній постановці, не розглядаючи конструкції та особливості конкретних електротехнічних пристроїв. Матеріал дисципліни ТОЕ, таким чином, є теоретичною базою для вивчення і засвоєння спеціальних дисциплін. В свою чергу, курс ТОЕ потребує при його вивченні знання основних розділів фізики і математики, зокрема, операцій з комплексними числами, диференціальних рівнянь, рядів Фур’є, перетворень Лапласа, векторного аналізу тощо.

Для студентів енергетичних спеціальностей курс ТОЕ викладається, зазвичай, протягом трьох семестрів, тому навчальна програма дисципліни складається з трьох частин.

В *першій* частині викладаються усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами. В *другій* частині розглядаються методи розрахунку перехідних процесів в лінійних та нелінійних колах, основні принципи теорії нелінійних кіл і основи синтезу лінійних електричних кіл. В *третьій* частині викладаються основи теорії електричних, магнітних та електромагнітних полів і методи їх розрахунку.

Для полегшення розуміння та засвоєння курсу основні положення теорії в кожному розділі ілюструються числовими прикладами з детальними розв’язками.

Перша частина курсу ТОЕ, що викладена в цій книзі, складається з дванадцяти розділів.

В *першому* розділі розглядаються основні поняття електричних кіл та основні закони електротехніки, а в *другому* – викладені принципи розрахунку електричних кіл синусоїдного струму.

В *третьому*, *четвертому* та *п’ятому* розділах розглянуті відповідно еквівалентні перетворення в колах, методи розрахунку складних електричних кіл та основні теореми лінійних електричних кіл.

Шостий розділ присвячений особливостям розрахунку кіл при несинусоїдних напругах, в *сьомому* розділі розглянуті резонансні явища в електричних колах, а у *восьмому* – індуктивно зв’язані електричні кола.

В *дев’ятому* розділі викладений аналіз трифазних електричних кіл, в *десятому* – розглядаються чотириполюсники, а в *одинадцятomu* – усталені режими кіл з розподіленими параметрами.

Нарешті, в *дванадцятomu* розділі наведені приклади розв’язання електротехнічних задач за допомогою сучасних комп’ютерних технологій. При цьому застосовані найбільш поширені програмні продукти, які дозволяють розв’язувати або моделювати задачі, як то Mathcad, Excel та Electronics Workbench.

Автори підручника висловлюють щиро й глибоку подяку шановним доктору технічних наук, професору, професору кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” В. І. Сеньку, доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри теоретичної

та загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка” П. Г. Стахіву, доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри електродинаміки національного авіаційного університету Л. В. Сібруку та викладачам кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”: члену НМК з напрямку “Електротехніка та електротехнологія”, доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри А. А. Щербі, кандидату технічних наук, професору І. А. Курило, кандидату технічних наук, професору В. І. Шеховцову, кандидату технічних наук, доценту Ю. Ф. Видолобу за критичні зауваження, рекомендації і слухні побажання, висунуті під час рецензування підручника, врахування яких, безумовно, поліпшило якість викладеного матеріалу.

РОЗДІЛ ПЕРШИЙ

ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТИ

1.1 Основні поняття електричного кола

Електричним колом називається сукупність пристроїв, призначених для тривалого проходження електричного струму.

Основні пристрої, з яких складається електричне коло:

- джерела електричної енергії – пристрої, які перетворюють енергію інших видів (механічну, теплову, світлову, хімічну, атомну) в електромагнітну;
- перетворювачі електромагнітної енергії – пристрої, які перетворюють електромагнітну енергію в зручну в кожному конкретному випадку форму: змінюють величину змінної напруги (трансформатори), частоту змінної напруги (перетворювачі частоти) тощо;
- пристрої для передавання електромагнітної енергії і сигналів (лінії передачі, лінії зв'язку);
- споживачі електромагнітної енергії – пристрої, які перетворюють електромагнітну енергію в інші види: механічну (електричні двигуни); теплову (нагрівачі); світлову (освітлювачі).

Електричний струм, що протікає в колі, є впорядкованим рухом електричних зарядів. Чисельно величина струму визначається як кількість електричного заряду q , який проходить через поперечний переріз провідника, за одиницю часу

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1)$$

В міжнародній системі одиниць (СІ) заряд вимірюється в кулонах (Кл), час – в секундах (с), а струм – в амперах (А).

Струм є скалярною алгебраїчною величиною, тобто може приймати додатні або від'ємні значення. За додатний напрямок струму прийнято вважати напрямок руху позитивних зарядів, які під дією сил електричного поля рухаються від точок вищого потенціалу до точок нижчого. При аналізі електричних кіл заздалегідь, як правило, додатний напрямок струму невідомий, тому при розрахунках кіл на їх окремих ділянках довільно задаються додатним напрямком струму та позначають його стрілкою.

Напруга на ділянці електричного кола (наприклад, між точками 1 та 2) чисельно дорівнює кількості енергії, яка витрачається на переміщення одиниці заряду

з точки 1 в точку 2

$$u = \frac{dw}{dq} . \quad (1.2)$$

Вимірюється напруга в *вольтах* (В). Це теж скалярна алгебраїчна величина, додатний напрямок якої приймають таким, що збігається з додатним напрямком струму. Якщо струм тече від точки 1 до точки 2, то потенціал точки 1 (φ_1) вищий за потенціал точки 2 (φ_2) і напруга між цими точками $u = \varphi_1 - \varphi_2$.

З (1.2) можна виразити енергію через струм та напругу:

$$w = \int_0^q u dq .$$

Якщо dq виразити з (1.1), отримаємо

$$w = \int_{-\infty}^t u idt . \quad (1.3)$$

В момент часу $t \rightarrow -\infty$ енергія приймається такою, що дорівнює нулю.

Миттєва потужність є швидкістю зміни енергії в часі

$$p = \frac{dw}{dt} . \quad (1.4)$$

Кожна група пристроїв електричного кола – це безліч різних конкретних приладів, які відрізняються за принципом дії, конструкцією тощо. Всю різноманітність складових частин електричного кола доцільно охарактеризувати певними ознаками, основними властивостями з електротехнічної точки зору і провести класифікацію *елементів* електричного кола за цими ознаками.

Під елементами електричного кола зазвичай розуміють не фізично існуючі частини електротехнічних пристроїв, а їх ідеалізовані моделі.

1.2 Джерела електромагнітної енергії

Незалежно від конкретного виконання джерел їх об'єднує одна загальна властивість – здатність перетворювати в електромагнітну енергію інші види енергії. Джерела є причиною виникнення струмів і напруг в електричних колах.

Розрізняють *незалежні* і *залежні* (керовані) джерела. Параметри (напруга та струм) незалежних джерел не залежать від зовнішнього діяння і визначаються тільки внутрішніми їх властивостями.

Струм і напруги залежних джерел можуть залежати від напруги або струму будь-якої вітки чи будь-якої ділянки кола. Залежні джерела – це, як правило, результат ідеалізації властивостей реальних електронних схем, що працюють в лінійному режимі.

Для аналізу кіл зручно вводити ідеалізовані незалежні джерела двох видів: *напруги* та *струму*.

Під *джерелом напруги* розуміють таке джерело, напруга якого не залежить від струму, що протікає через нього (отже, і від навантаження). В джерелах на-

пруги під дією так званих *сторонніх сил* (хімічні реакції, електромагнітні сили тощо) відбувається примусове розділення позитивних та негативних зарядів проти сил електричного поля і поява різних значень потенціалів на затискачах джерела. Створена таким чином різниця потенціалів називається *електрорушійною силою* (е.р.с.), яка вимірюється в вольтах.

Умовне графічне зображення джерела напруги показано на рис. 1.1, а, де напрямок стрілки усередині кружка показує напрямок дії е.р.с., при цьому $e = \varphi_1 - \varphi_2$. Оскільки $\varphi_1 > \varphi_2$, то напруга джерела направлена від точки 1 до точки 2, тому при вказаних напрямках е.р.с. та напруги $u = e$.

Під *джерелом струму* розуміють таке джерело, сила струму i якого не залежить від властивостей кола, зовнішнього відносно джерела. Графічне зображення джерела струму показано на рис. 1.1, б, де стрілки характеризують позитивний напрямок струму джерела.

Розглянуті джерела є *ідеальними*.

Зауважимо, якщо в деякому інтервалі часу напруга джерела напруги дорівнює нулю, то дорівнює нулю і напруга між затискачами 1 і 2; отже, затискачі 1 та 2 в ці інтервали часу, коли $u = 0$, з'єднані накоротко (рис. 1.2, а).

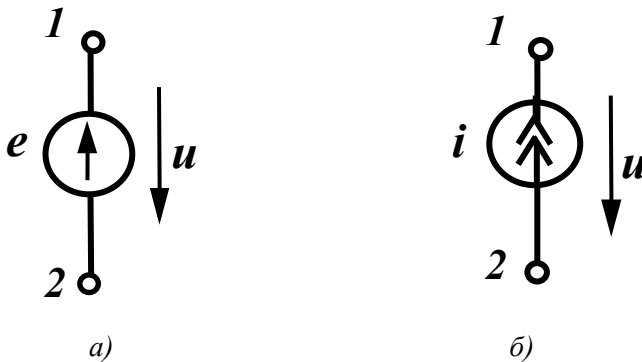


Рисунок 1.1

Якщо в деякому інтервалі часу струм джерела струму дорівнює нулю, то у вітці, яка містить в собі це джерело, не може протікати струм, викликаний будь-якими іншими джерелами, що знаходяться в колі. Тому для цього інтервалу часу вітка з джерелом струму виявляється розімкнутою (рис. 1.2, б).

Інакше кажучи, внутрішній опір ідеальної е.р.с. *дорівнює нулю*, а ідеального джерела струму – *нескінченності*.

З М І С Т

ВСТУП	3
Розділ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТИ	5
1.1 Основні поняття електричного кола	5
1.2 Джерела електромагнітної енергії.....	6
1.3 Пасивні елементи електричного кола	9
1.4 Електричні схеми	14
1.5 Основні топологічні поняття електричних кіл.....	15
1.6 Основні закони і рівняння електричних кіл	19
Розділ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	26
2.1 Основні поняття і співвідношення	26
2.2 Діюче значення змінного струму	28
2.3 Зображення синусоїдних функцій векторними величинами	29
2.4 Синусоїдний струм в пасивних елементах електричного кола	31
2.5 Послідовне з'єднання елементів r, L, C при синусоїдному струмі	36
2.6 Потужність в колах синусоїдного струму	39
2.7 Метод комплексних амплітуд (символічний метод) для аналізу кіл із синусоїдними струмами	42
2.8 Умови передавання максимальної потужності в навантаження.....	48
Розділ 3. ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ	51
3.1 Перетворення послідовного і паралельного з'єднання опорів	51
3.2 Побудова векторних діаграм	54
3.3 Перетворення зірки опорів в трикутник і обернене перетворення.....	57
3.4 Перетворення активних віток	59
Розділ 4. МЕТОДИ АНАЛІЗУ УСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ	64
4.1 Використання законів Кірхгофа	64
4.2 Метод вузлових потенціалів	66
4.3 Метод вузлових потенціалів при наявності ідеальних джерел напруги і струму	70
4.4 Метод контурних струмів	74
4.5 Метод контурних струмів при наявності джерел струму.....	79
Розділ 5. ОСНОВНІ ТЕОРЕМИ ТЕОРІЇ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	81
5.1 Теорема накладання.....	81
5.2 Використання теореми накладання.....	82
5.3 Принцип дуальності.....	84
5.4 Теорема (принцип) взаємності.....	85
5.5 Теорема компенсації.....	86
5.6 Теорема про еквівалентне джерело	87
5.7 Використання теореми про еквівалентне джерело	89

Розділ 6. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПРИ ПЕРІОДИЧНИХ НЕСИНУСОЇДНИХ НАПРУГАХ І СТРУМАХ	95
6.1 Зображення періодичних несинусоїдних функцій рядами Фур'є	95
6.2 Наближені методи визначення коефіцієнтів ряду Фур'є	99
6.3 Діючі значення несинусоїдних струмів і напруг	101
6.4 Розрахунок електричних кіл при несинусоїдних напругах	102
6.5 Потужність в колах з несинусоїдними струмами	103
6.6 Коефіцієнти, які характеризують відмінність кривої від синусоїди	107
Розділ 7. РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ	114
7.1 Резонанс в послідовному контурі. Резонанс напруг	114
7.2 Частотні характеристики послідовного контуру	117
7.3 Енергетичні співвідношення при резонансі	121
7.4 Паралельний контур	123
7.5 Компенсація зсуву фаз	126
Розділ 8. ІНДУКТИВНО ЗВ'ЯЗАНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА	130
8.1 Основні поняття і співвідношення	130
8.2 Узгоджене і зустрічне з'єднання котушок	132
8.3 Послідовне з'єднання індуктивно зв'язаних котушок	133
8.4 Розрахунок електричних кіл з індуктивно зв'язаними вітками	135
8.5 Вилучення магнітного зв'язку	137
8.6 Трансформатор в лінійному режимі	138
8.7 Еквівалентні схеми заміщення трансформаторів	141
8.8 Енергетичні співвідношення в індуктивно зв'язаних колах	144
Розділ 9. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА	149
9.1 Основні поняття та співвідношення	149
9.2 Лінійні і фазні величини	153
9.3 Розрахунок симетричних трифазних кіл	155
9.4 Розрахунок несиметричних трифазних кіл	157
9.5 Потужності в трифазних колах	164
9.6 Обертове магнітне поле	166
9.7 Розкладання несиметричної системи векторів на симетричні складові	168
9.8 Метод симетричних складових	171
9.9 Вищі гармоніки в трифазних колах	179
Розділ 10. ЧОТИРИПОЛЮСНИКИ ТА ЇХ ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ	184
10.1 Основні рівняння чотириполюсника	184
10.2 Визначення параметрів чотириполюсників	187
10.3 Найпростіші чотириполюсники	189
10.4 Схеми заміщення чотириполюсників	192
10.5 Характеристичні параметри чотириполюсників	194
10.6 Основні поняття про електричні фільтри	197
10.7 Умова пропускання реактивних фільтрів	199
10.8 Електричні фільтри типу k	200

Розділ 11. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ	205
Вступ	205
11.1 Диференціальні рівняння однорідної лінії	207
11.2 Усталений режим роботи лінії за дії синусоїдної вхідної напруги	209
11.3 Пряма та зворотна хвилі	211
Вторинні параметри однорідної лінії	211
11.4 Відбивання хвиль. Узгоджений режим	221
11.5 Передавання потужності і коефіцієнт корисної дії	226
11.6 Схеми заміщення лінії	227
11.7 Вхідний опір лінії	230
11.8 Лінія без спотворень	234
11.9 Лінія без втрат	237
11.10 Лінія без втрат в режимах холостого ходу та короткого замикання	241
11.11 Реактивно навантажена лінія без втрат	250
11.12 Деякі приклади використання відрізків довгих ліній	253
11.12.1 Узгодження лінії з навантаженням	253
11.12.2 Відрізки довгих ліній як елементи резонансного кола	255
11.12.3 Кріплення ліній передач, що працюють за надвисоких робочих частот	256
Розділ 12. КОМП'ЮТЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	258
12.1 Приклади до другого розділу	259
12.2 Приклади до третього розділу	264
12.3 Приклади до четвертого розділу	269
12.4 Приклади до шостого розділу	271
12.5 Приклади до сьомого розділу	289
12.6 Приклади до восьмого розділу	295
12.7 Приклади до дев'ятого розділу	297
12.8 Приклади до десятого розділу	308
12.9 Приклади до одинадцятого розділу	310
ЛІТЕРАТУРА	318
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	319