

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
УСТАЛЕНІ РЕЖИМИ ЛІНІЙНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ
ТА РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Підручник

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 621.3(075)
ББК 31.211я73
Т33

Автори:

**Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук,
Ю. Г. Ведміцький**

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів. Лист № 1/11-10780 від 24.11.2010.

Рецензенти:

В. І. Сенько, доктор технічних наук, професор
П. Г. Стахів, доктор технічних наук, професор
Л. В. Сібрук, доктор технічних наук, професор

Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими
Т33 лінійних електричних кіл із зосередженими та розподі-
леними параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Ка-
цев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький ; під ред. проф.
Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.
ISBN 978-966-641-438-3

В підручнику викладено теорію лінійних електричних кіл із зо-
середженими та розподіленими параметрами і наведено велику кількіть
прикладів теоретичного та практичного спрямування, які зустрічають-
ся в електроенергетиці, електромеханіці, радіотехніці тощо. Матеріал
подано в обсязі, необхідному для проведення теоретичних та техніч-
них розрахунків із застосуванням сучасного програмного забезпечен-
ня. Книга розрахована на студентів, аспірантів та викладачів електро-
технічних, електроенергетичних та електромеханічних спеціальностей.

УДК 621.3
ББК 31.211я73

ISBN 978-966-641-438-3

© Ю. Карпов, С. Кацев,
В. Кухарчук, Ю. Ведміцький, 2011

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ перший. Електричне коло, електрична схема та їх елементи	9
1.1 Основні поняття електричного кола.....	9
1.2 Джерела електромагнітної енергії.....	11
1.3 Пасивні елементи електричного кола.....	14
1.4 Електричні схеми.....	19
1.5 Основні топологічні поняття електричних кіл.....	20
1.6 Основні закони і рівняння електричних кіл.....	24
Розділ другий. Електричні кола змінного синусоїдного струму.....	32
2.1 Основні поняття і співвідношення.....	32
2.2 Діюче значення змінного струму.....	34
2.3 Зображення синусоїдних функцій векторними величинами.....	36
2.4 Синусоїдний струм в пасивних елементах електричного кола.....	37
2.5 Послідовне з'єднання елементів r , L , C при синусоїдному струмі.....	43
2.6 Потужність в колах синусоїдного струму.....	47
2.7 Метод комплексних амплітуд (символічний метод) для аналізу кіл із синусоїдними струмами.....	51
2.8 Умови передавання максимальної потужності в навантаження.....	58
Розділ третій. Еквівалентні перетворення в електричних колах.....	61
3.1 Перетворення послідовного і паралельного з'єднання опорів.....	61
3.2 Побудова векторних діаграм.....	65

3.3 Перетворення зірки опорів в трикутник і зворотне перетворення.....	67
3.4 Перетворення активних віток.....	70
Розділ четвертий. Методи аналізу стаціонарних процесів в електричних колах.....	75
4.1 Використання законів Кірхгофа.....	75
4.2 Метод вузлових потенціалів.....	77
4.3 Метод вузлових потенціалів при наявності ідеальних джерел напруги і струму.....	82
4.4 Метод контурних струмів.....	87
4.5 Метод контурних струмів при наявності джерел струму.....	92
Розділ п'ятий. Основи теореми теорії лінійних електричних кіл та їх використання.....	95
5.1 Теорема накладання.....	95
5.2 Використання теореми накладання.....	96
5.3 Принцип дуальності.....	98
5.4 Теорема (принцип) взаємності.....	100
5.5 Теорема компенсації.....	101
5.6 Теорема про еквівалентне джерело.....	101
5.7 Використання теореми про еквівалентне джерело.....	104
Розділ шостий. Електричні кола при періодичних несинусоїдних напругах і струмах.....	110
6.1 Зображення періодичних несинусоїдних функцій рядами Фур'є.....	110
6.2 Наближені методи визначення коефіцієнтів ряду Фур'є.....	115
6.3 Діюче значення несинусоїдних струмів і напруг.....	116
6.4 Розрахунок електричних кіл при несинусоїдних напругах і струмах.....	118
6.5 Потужність в колах з несинусоїдними струмами.....	119
6.6 Коефіцієнти, які характеризують відмінність кривої від синусоїди.....	123
Розділ сьомий. Резонансні явища в електричних колах.....	131
7.1 Резонанс в послідовному контурі. Резонанс напруг.....	131
7.2 Частотні характеристики послідовного контуру.....	134

7.3	Енергетичні співвідношення при резонансі.....	139
7.4	Паралельний контур.....	141
7.5	Компенсація зсуву фаз.....	145
Розділ восьмий. Індуктивно зв'язані електричні кола.....		150
8.1	Основні поняття і співвідношення.....	150
8.2	Узгоджене і зустрічне з'єднання котушок.....	152
8.3	Послідовне з'єднання індуктивно зв'язаних катушок.....	153
8.4	Розрахунок електричних кіл з індуктивно зв'язаними вітками.....	155
8.5	Вилучення магнітного зв'язку.....	157
8.6	Трансформатор в лінійному режимі.....	159
8.7	Еквівалентні схеми заміщення трансформаторів.....	163
8.8	Енергетичні співвідношення в індуктивно зв'язаних колах.....	166
Розділ дев'ятий. Трифазні електричні кола.....		172
9.1	Основні поняття та співвідношення.....	172
9.2	Лінійні і фазні величини.....	176
9.3	Розрахунок симетричних трифазних кіл.....	179
9.4	Розрахунок несиметричних трифазних кіл.....	181
9.5	Потужності в трифазних колах.....	189
9.6	Обертове магнітне поле.....	191
9.7	Розкладання несиметричної системи векторів на симетричні складові.....	194
9.8	Метод симетричних складових.....	196
9.9	Вищі гармоніки в трифазних колах.....	206
Розділ десятий. Чотириполюсники та їх основні властивості.....		212
9.1	Основні рівняння чотириполюсника.....	212
9.2	Визначення параметрів чотириполюсників.....	215
9.3	Найпростіші чотириполюсники.....	219
9.4	Схеми заміщення чотириполюсників.....	222
9.5	Характеристичні параметри чотириполюсників.....	224
9.6	Основні поняття про електричні фільтри.....	228
9.7	Умова пропускання реактивних фільтрів.....	230
9.8	Електричні фільтри типу к.....	232

Розділ одинадцятий. Електричні кола з розподіленими параметрами в усталеному режимі.....	237
Вступ.....	237
11.1 Диференціальні рівняння однорідної лінії.....	239
11.2 Усталений режим роботи лінії за дії синусоїдної вхідної напруги.....	242
11.3 Пряма та зворотна хвилі. Вторинні параметри однорідної лінії	245
11.4 Відбивання хвиль. Узгоджений режим.....	258
11.5 Передавання потужності і коефіцієнт корисної дії.....	264
11.6 Схеми заміщення лінії.....	267
11.7 Вхідний опір лінії.....	270
11.8 Лінія без спотворень.....	275
11.9 Лінія без втрат.....	280
11.10 Лінія без втрат в режимах холостого ходу та короткого замикання.....	285
11.11 Реактивно навантажена лінія без втрат.....	296
11.12 Деякі приклади використання відрізків довгих ліній.....	301
Розділ дванадцятий. Комп'ютерний розрахунок та моделювання електричних кіл.....	307
12.1 Приклади до другого розділу	308
12.2 Приклади до третього розділу	314
12.3 Приклади до четвертого розділу	318
12.4 Приклади до шостого розділу	321
12.5 Приклади до сьомого розділу	339
12.6 Приклади до восьмого розділу	346
12.7 Приклади до дев'ятого розділу	348
12.8 Приклади до десятого розділу	360
12.9 Приклади до одинадцятого розділу	362
Література.....	372
Предметний покажчик.....	374

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 *одинадцятому* – усталені режими кіл з розподіленими параметрами.

Нарешті, в *дванадцятому* 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 щирю 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. Сібрику 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 слушні 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

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

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 кін 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 напруги 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 вольтгах.

Умовне графічне зображення джерела напруги показано на рис. 1.1, *a*, 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).

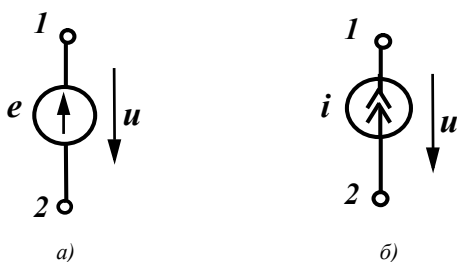


Рисунок 1.1

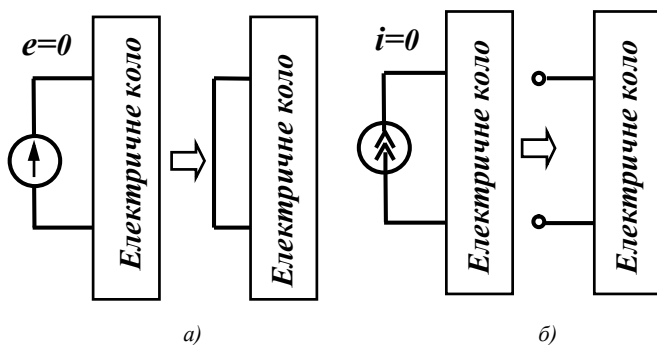


Рисунок 1.2

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 джере-

лом струму виявляється розімкнутою (рис. 1.2, б).

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

Залежні (керовані) джерела, які зображені на рис. 1.3, також можна розділити на джерела напруги і струму, які можуть змінюватися залежно від струмів або напруг в інших вітках.

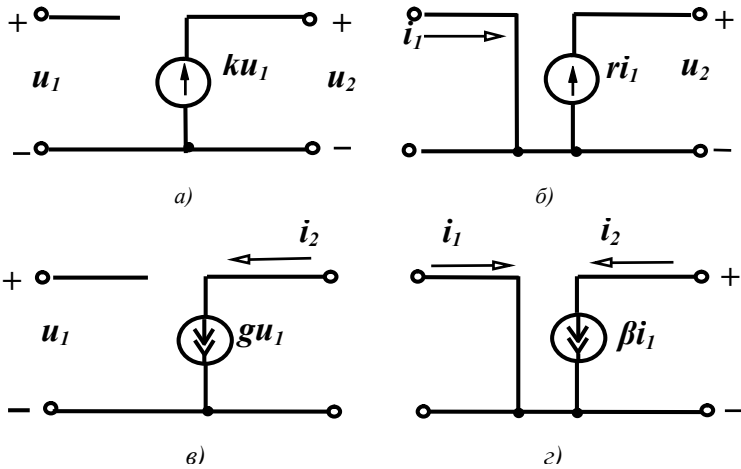


Рисунок 1.3

Розрізняють чотири типи залежних джерел:

а) джерела напруги, керовані напругою (ДНКН) (рис. 1.3, а).

Напруга джерела пропорційна напрузі u_1

$$u_2 = ku_1; \quad (1.5)$$

б) джерела напруги, керовані струмом (ДНКС) (рис. 1.3, б)

$$u_2 = ri_1; \quad (1.6)$$

в) джерела струму, керовані напругою (ДСКН) (рис. 1.3, в)

$$i_2 = gu_1; \quad (1.7)$$

з) джерела струму, керовані струмом (ДСКС) (рис. 1.3, з)

$$i_2 = \beta i_1. \quad (1.8)$$

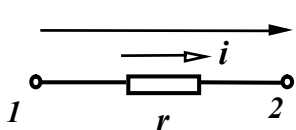
Ділянки електричного кола, які містять джерела енергії, називають *активними*, а ті, в яких джерела відсутні – *пасивними*.

1.3 Пасивні елементи електричного кола

Для класифікації пасивних елементів слід виділити найбільш суттєві загальні ознаки, властиві тим чи іншим елементам. Із курсу фізики відомо, що протікання електричного струму в колі пов'язане із виникненням електричного та магнітного полів і перетворенням електричної енергії в теплову або інші види енергії. Точніше кажучи, ці явища мають місце на всіх ділянках електричного кола, однак їх інтенсивність на різних ділянках неоднорівна. Залежно від того, яке явище переважає на ділянці, розрізняють три типи пасивних елементів – резистивний, індуктивний та ємнісний.

Резистивний елемент

Під *резистивним елементом* або *активним опором* розуміють такий ідеалізований елемент електричного кола, в якому електромагнітна енергія безповоротно перетворюється в теплоту або в інші види енергії. При цьому вважають, що на цій ділянці кола відсутні електричні або магнітні поля. Графічне зображення резистора показано на рис. 1.4.



Зв'язок між напругою і струмом на ділянці з резистивним елементом визначається відношенням

$$u = ri. \quad (1.9)$$

Рисунок 1.4 Величина r називається *електричним опором* і вимірюється в омах [Ом]; величина, обернена опору,

$$g = \frac{1}{r} \quad (1.10)$$

називається *провідністю* і вимірюється в сименсах [См].

Миттєва потужність, що виділяється у вигляді теплоти в резисторі, визначається із (1.4) та (1.9):

$$p = ui = ri^2. \quad (1.11)$$

Миттєва потужність не набуває від'ємних значень, тому в будь-який момент часу енергія надходить від джерела до резистора.

Індуктивний елемент

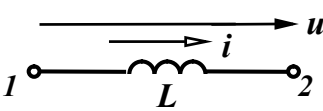
Елемент електричного кола, який характеризує створення магнітного поля і запасання енергії в ньому, називають *індуктивним елементом* або *індуктивністю*. Індуктивність в електричному колі реалізують за допомогою *індуктивної котушки*, яка має малий активний опір.

Умовне зображення індуктивного елемента з позитивними напрямками струму і напруги показано на рис. 1.5.

Магнітне поле характеризується потокозчепленням ψ , яке пропорційне струму, що протікає

$$\psi = Li. \quad (1.12)$$

Коефіцієнт пропорційності L називають індуктивністю і вимірюють в генрі [Гн].



Зв'язок між напругою і струмом на ділянках, які містять індуктивність, встановлюється на основі закону електромагнітної індукції:

Рисунок 1.5

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (1.13)$$

Якщо в резистивному елементі криві струму і напруги подібні (рис. 1.6, *a*), то криві струму і напруги на індуктивному елементі можуть значно відрізнятись (рис. 1.6, *б*).

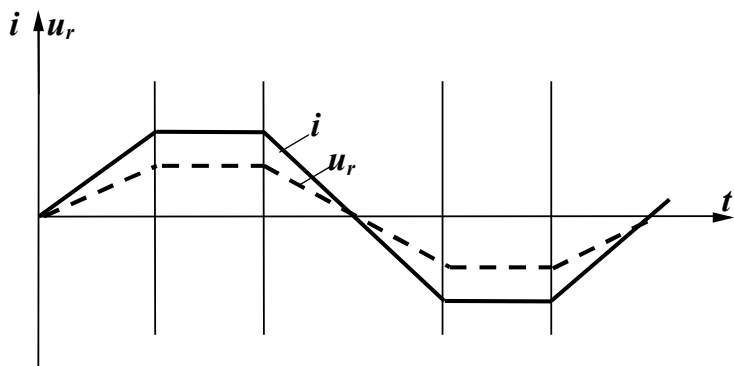
Миттєва потужність

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.14)$$

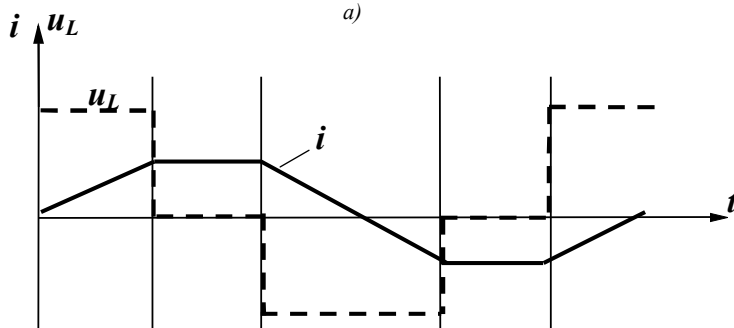
може набувати як додатних, так і від'ємних значень, тобто індуктивний елемент може приймати енергію ($p > 0$) і запасати її в магнітному полі та повертати її до джерела ($p < 0$).

Кількість енергії, яка запасається магнітним полем,

$$w = \int_0^t u i dt = \int_0^i L i di = \frac{Li^2}{2}. \quad (1.15)$$



a)



б)

Рисунок 1.6

Ємнісний елемент

Елемент електричного кола, який характеризує створення електричного поля і запасає в ньому енергію, називається *ємнісним елементом*. Умовне зображення ємнісного елемента показано на рис. 1.7. Ємність в електричному колі реалізують спеціально виготовленим елементом – *конденсатором*. Найпростіший конденсатор складається з двох металевих пластин, розділених діелектриком.

В конденсаторі заряд пропорційний напрузі:

$$q = C u. \quad (1.16)$$

Величину C називають *ємністю* і вимірюють у фарадах [Ф].

Зв'язок між струмом і напругою визначається співвідношенням

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (1.17)$$

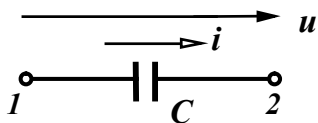


Рисунок 1.7

Форми струму і напруги на ємнісному елементі також можуть не збігатися. (Для форми струму, що зображена на рис. 1.6, побудувати самостійно криву напруги).

Миттєва потужність на ємнісному елементі

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1.18)$$

також може набувати додатних і від'ємних значень.

Енергія, яка запасється в електричному полі,

$$w = \int_{-\infty}^t u i dt = \int_0^u C u du = \frac{Cu^2}{2}. \quad (1.19)$$

Вирази, що пов'язують струм і напругу на пасивних елементах (1.9), (1.13), (1.17), часто називають *компонентними* співвідношеннями.

$$u_r = ri, \quad u_L = L \frac{di}{dt}, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Розглянуті активні і пасивні елементи є *ідеальними*. Реальні джерела відрізняються від ідеальних передусім тим, що напруги і струми на їх затискачах залежать від навантаження, викликаного наявністю внутрішніх опорів або провідностей. Такі реальні джерела можна зобразити як послідовне з'єднання ідеального джерела напруги і внутрішнього опору r_0 (рис. 1.8, а) або паралельне з'єднання ідеального джерела струму і внутрішньої провідності g_0 (рис. 1.8, б).

В реальному джерелі напруги, якщо воно працює в замкненому колі, напруга на його затискачах менша за е.р.с. на величини

ну напруги на його внутрішньому опорі (r_0) $u = e - ir_0$.

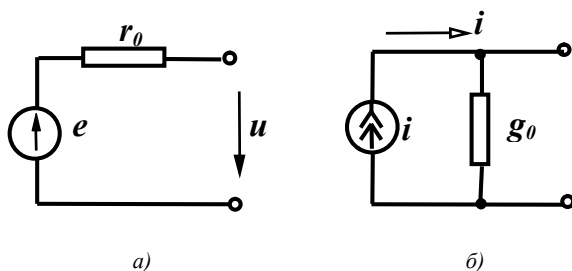


Рисунок 1.8

Реальні прообрази резистивного, індуктивного та ємнісного елементів разом з головними параметрами мають також інші побічні (паразитні) параметри. Наприклад, резистивний елемент, що має вигляд дрютяного реостата, крім активного опору r містить індуктивність витків L_0 і міжвиткову ємність C_0 (рис.1.9, а).

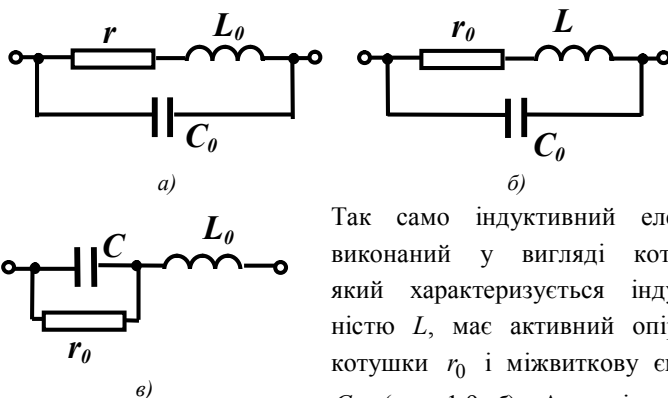


Рисунок 1.9

Так само індуктивний елемент, виконаний у вигляді котушки, який характеризується індуктивністю L , має активний опір цієї котушки r_0 і міжвиткову ємність C_0 (рис. 1.9, б). Аналогічний вигляд має схема заміщення конденсатора з “паразитними” параметрами (рис. 1.9, в).

Залежно від умов роботи кола величини “паразитних” параметрів можуть змінюватися і деякими з них можна знехтувати. Так, наприклад, при низькій частоті можна знехтувати параметрами L_0 і C_0 .

1.4 Електричні схеми

Графічне зображення електричного кола називають *електричною схемою* (рис. 1.10).

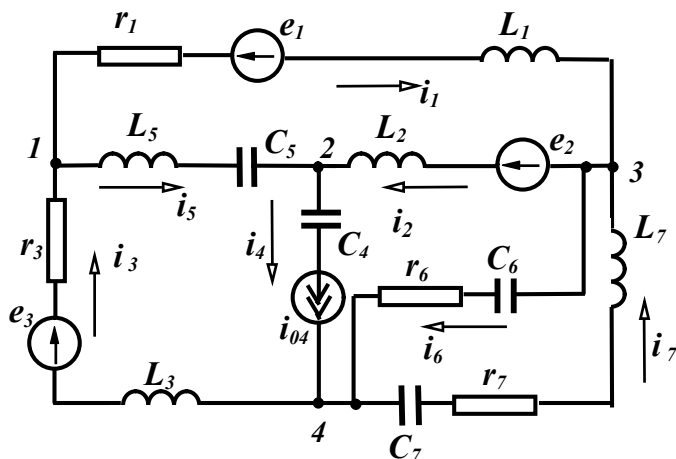


Рисунок 1.10

Основними поняттями, які характеризують геометричну структуру кола, є *вітка* і *вузол*. Під віткою розуміють ділянку кола, вздовж якої струм в будь-який момент часу має одне і те саме значення. Звичайно, всі елементи, які входять до однієї вітки, одержують однакові індекси і тоді вітки зручно нумерувати. Так, точки 1 та 3 (рис. 1.10) з'єднуються віткою 1, точки 1 та 2 – віткою 5 тощо. Якщо вітка містить кілька елементів, то ці елементи з'єднані *послідовно*. Наприклад, у вітці 3 елементи r_3 , e_3 , L_3 з'єднані послідовно.

Вузлом називають точку схеми, де з'єднуються три або більше вітки. В схемі рис.1.10 є чотири вузли, які позначаються відповідними цифрами. Дві або більше віток, приєднані до тих самих двох вузлів, називають *паралельними* вітками, а таке з'єднання – *паралельним*. Вітки 6 і 7 з'єднані паралельно, оскільки вони з'єднані з тими ж самими вузлами 3 та 4.

Зазвичай задані конфігурація кола, параметри елементів і джерел. Задача аналізу кола в цьому випадку полягає у визначен-

ні струмів усіх віток, для чого необхідно довільно задатися напрямом струму у вітках. Треба мати на увазі, що струми в вітках, які містять джерела струму, відомі, оскільки дорівнюють струму джерела струму. У вітці 4 (рис. 1.10) струм уже відомий – він дорівнює i_{04} , незалежно від кількості, характеру і значення параметрів елементів, що входять в коло.

1.5 Основні топологічні поняття електричних кіл

Введемо поняття про *граф* кола, який описує властивості кіл, що зв'язані з геометричною структурою кола незалежно від елементів, які входять у вітку. Таке зображення кіл дозволяє формулювати рівняння кола за допомогою комп'ютерних програм.

Зобразимо схему (рис. 1.10), не показуючи конкретних елементів у вітках (рис. 1.11, а). Така схема є графом кола. Система з'єднаних відрізків ліній, які характеризують конфігурацію кола, називається *графом кола*. Елементами графу є *вітки (ребра)* та *вузли (вершини)*. Якщо у всіх вітках графу показати стрілками напрямки струмів, то такий граф називається *напрямленим* або *орієнтованим*.

Графи, в яких існує взаємооднозначна відповідність між вузлами і вітками, називають *ізоморфними* (рис. 1.11, а, б).

Будь-яка частина графу називається *підграфом*. Згідно з цим означенням підграфом може бути одна вітка або один ізольований вузол графу, а також будь-яка множина віток і вузлів, які містяться в цьому графі.

Неперервна послідовність віток, яка зв'язує пару вибраних вузлів, проходячи кожен вузол не більше одного разу, називається *шляхом графу* (або *ланцюгом*). Наприклад, для графу на рис. 1.11, а між вузлами 1 і 4 можна створити шляхи, які складаються із віток 1-2-4, 5-2-7, 5-4, 1-6 та ін.

Замкнутий шлях, у якого початковий і кінцевий вузол збігаються, називається *контуром*. Для графу на рис. 1.11, а можна вказати, наприклад, контури, створені вітками 1-7-3, 1-6-4-5, 5-4-3 тощо.

Граф, у якого між будь-якими двома вузлами є шлях, назива-

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Теоретичні основи електротехніки : [підруч.] / Г. П. Балан, П. О. Кравченко, Ю. Ф. Свєргун, О. Є. Щєрбаков – К. : Інтас, 2007. – 325 с.
2. Теоретичні основи електротехніки : [підруч. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. : У 3 т.] / І. М. Чиженко (заг. ред.), В. С. Бойко (заг. ред.).
Т. 1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / [Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін.] – К. : Політехніка, 2004. – 272 с.
3. Теоретичні основи електротехніки : [підруч.] / А. М. Воєйков, С. В. Астапов, І. Я. Лізан, В. В. Коломієць – Х., 2007. – 364 с.
4. Теоретические основы электротехники : [В 3-х томах. Учебник для вузов].
Том 1 : [4 изд.] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровин, В. Л. Чечурин – СПб : Питер, 2003. – 463 с.
5. Теоретические основы электротехники : [В 3-х томах. Учебник для вузов].
Том 2 : [4 изд.] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровин, В. Л. Чечурин – СПб : Питер, 2003. – 576 с.
6. Перхач В. С. Теоретична електротехніка / Перхач В. С. – К. : Вища школа, 1992. – 440 с.

Рекомендована

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч.1 / Атабеков Г. И. – М. : Энергия, 1978. – 280 с.
2. Теория линейных электрических цепей. / [Афанасьев Б. П., Гольдин О. Е., Кляцкин И. Г., Пинес Г. Я.]. – М. : Высшая школа, 1973. – 591 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. / Бессонов Л. А. – М. : Высшая школа, 1973. – 750 с.
4. Дрючин В. Г. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : [навч. посіб.] / Дрючин В. Г. – Алчевськ : ДонДТУ, 2009. – 214 с.
5. Конспект лекцій з курсу “Теоретичні основи електротехніки”. Ч.1 / [Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г.]. – Вінниця : ВПШ, 1992. – 174 с.
6. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Розділ “Електричні кола з розподіленими параметрами” : [навч. посіб. для студ. напряму підготовки 0906 – “Електротехніка”] / Карпов Ю. О., Мадьяров В. Г. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 102 с.
7. Кацив С. Ш. Комп’ютерне моделювання електричних кіл. [лабораторний практикум] / Кацив С. Ш., Мад’яров В. Г., Говор І. К. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 89 с.
8. Чабан В. Теоретична електротехніка : [навч. посіб. для електротехнічних фахів] / Чабан В. – Л., 1998. – 240 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Активний опір, 14

Активна потужність, 39

Амплітудне значення
струму, 33

Б

Баланс потужностей, 49

В

Вітка електричної схеми, 19

Взаємна індуктивність, 151

Вузол

електричної схеми, 19
стоячої хвилі, 289

Г

Гармоніка

вища, 111

нульова, 111

перша, 111

Граф

ізоморфний, 20

напрявлений, 20

схеми

дерево, 21

контур, 20

ліс, 21

переріз, 22

підграф, 20

хорда, 21

Д

Джерело

електричної енергії, 9

залежне, 11

ідеальне, 12

незалежне, 11

напруги, 11

струму, 11

Діюче значення

синусоїдного струму та

напруги, 34

несинусоїдного струму та

напруги, 117

Діаграма

векторна, 37

променева, 45

топографічна, 45

хвильова, 36

Добротність контуру, 133

Довжина хвилі, 247

Е

Елемент

емнісний, 16

індуктивний, 15

резистивний, 14

Електричний фільтр, 228

Є

Ємність, 17

З

Закон

- Кірхгофа
- другий, 25
- перший, 25

З'єднання

- зіркою, 176
- зустрічне, 152
- паралельне, 19
- послідовне, 19
- трикутником, 176
- узгоджене, 152

Зміщення нейтралі, 181

І

Індуктивність, 15

К

Конденсатор, 16

Коефіцієнт

- амплітуди, 123
- відбиття, 262
- згасання, 226, 248
- магнітного зв'язку, 151
- нелінійних спотворень, 124
- потужності, 120
- поширення, 248
- спотворення, 124
- трансформації, 162
- фазовий, 226, 248

Л

Лінія

- без втрат, 279
- без спотворень, 276
- довга, 256
- однорідна, 238

М

Матриця

- з'єднань, 22
- контурів, 24
- перерізів, 24

Метод

- вузлових потенціалів, 78
- контурних струмів, 87
- симетричних складових, 196

Миттєве значення струму, 33

О

Обертове магнітне поле, 191

Опір

- активний, 14
- взаємної індукції, 153
- власний, 89
- ємнісний, 42
- індуктивний, 40
- комплексний, 55
- повний, 44
- реактивний, 44
- спільний, 89
- хвильовий, 243

П

Період, 32

Потужність

- активна, 39
- комплексна, 57
- миттєва, 39
- натуральна, 264
- повна, 48
- реактивна, 48
- спотворення, 120

Провід
лінійний, 174
нульовий, 174

Провідність
активна, 14
взаємна, 96
власна, 80
вхідна, 96
ємнісна, 42
індуктивна, 40
комплексна, 56
спільна, 80

Пучність, 289

Р

Резонанс
напруг, 133
струмів, 142

С

Симетричні складові, 194

Спектр
Амплітудно-частотний, 111
Фазочастотний, 111

Струм
вузловий, 80
змінний, 32
контурний, 87
лінійний, 176
несинусоїдний, 110
періодичний, 32
постійний, 32
синусоїдний, 33
фазний, 176

Т

Теорема
взаємності, 100
компенсації, 101
накладання, 95
про еквівалентне
джерело, 101
Трансформатор, 159
Трифазне електричне коло
несиметричне, 174
симетричне, 174

Ф

Фаза коливань, 33
Фаза початкова, 33
Фазова швидкість, 247

Х

Хвиля
відбита, 250
пряма,
стояча, 289

Ч

Частота, 32
Частотна характеристика,
134
Чергування фаз
зворотне, 194
нульове, 194
пряме, 174
Чотириполюсник, 212
постійна передачі, 225
характеристичний опір,
224

Навчальне видання

**Карпов Юхим Овдійович
Кацев Самоїл Шулімович
Кухарчук Василь Васильович
Ведміцький Юрій Григорович**

**Теоретичні основи електротехніки.
Усталені режими лінійних електричних кіл
із зосередженими та розподіленими параметрами**

Підручник

Редактор О. Скалоцька

Оригінал-макет підготовлено С. Кацевом

Підписано до друку 14.12.2011 р. Формат 29,7×42¼.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 21,94.
Наклад 500 (1-й запуск 1–150) прим. Зам. № 2011-190.

Вінницький національний технічний університет,
комп'ютерний інформаційно-видавничий центр.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.