

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

Ю. О. Карпов Ю. Г. Ведміцький В. В. Кухарчук С. Ш. Каців

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ
в лінійних колах

СИНТЕЗ
лінійних кіл

Електричні та магнітні
НЕЛІНІЙНІ КОЛА

Підручник

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 621.3(075)

ББК 31.211я73

Т33

Автори:

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

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів. Лист № 1/11 10710 від 23.11.2010.

Рецензенти:

В. І. Сенько, доктор технічних наук, професор

П. Г. Стахів, доктор технічних наук, професор

Л. В. Сібрुक, доктор технічних наук, професор

Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник / [Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. та ін.] за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 530 с.

ISBN ; 9: /; 88/863/668/:

У підручнику викладено теорію електричних і магнітних кіл, де розглянуто перехідні процеси в лінійних колах із зосередженими та розподіленими параметрами, синтез лінійних кіл, нелінійні електричні й магнітні кола за ustalених і динамічних режимів роботи та наведено велику кількість прикладів теоретичного і практичного спрямування. Матеріал подано в обсязі, необхідному для проведення теоретичних і технічних розрахунків із застосуванням сучасного програмного забезпечення. Підручник розрахований на студентів, аспірантів і викладачів вищих навчальних закладів.

**УДК 621.3
ББК 31.211я73**

ISBN ; 9: /; 88/863/668/:

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

Зміст

Перехідні процеси в лінійних колах

Вступ	12
Розділ 1 Класичний метод розрахунку перехідних процесів	14
1.1 Вмикання кола r, L на постійну напругу	14
1.2 Вмикання кола r, C на постійну напругу	18
1.3 Відімкнення кола r, L від джерела постійної напруги	22
1.4 Під'єднання кола r, L до джерела синусоїдної напруги	25
1.5 Перехідний процес в розгалужених колах, що містять один реактивний елемент	28
1.6 Незалежні і залежні початкові умови	31
1.7 Під'єднання кола з елементами r, L, C до джерела постійної напруги	36
1.8 Розрахунок перехідних процесів в складних розгалужених колах	44
1.9 Методи складання характеристичних рівнянь ...	56
1.9.1 Метод алгебризації диференціальних рівнянь	56
1.9.2 Метод вхідного опору	58
1.10 Закони комутації в узагальненій формі	62
1.11 Розрахунок перехідних процесів класичним методом за допомогою програм комп'ютерної математики. Система Maple	68
<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>75</i>

Розділ 2	Операторний метод розрахунку перехідних процесів	77
2.1	Деякі властивості перетворення Лапласа	77
2.2	Використання перетворення Лапласа для розрахунку перехідних процесів	82
2.3	Закони Ома і Кірхгофа в операторній формі	84
2.4	Операторні схеми	92
2.5	Перехід від зображення до оригіналу	95
2.6	Розрахунок перехідних процесів операторним методом за допомогою програм комп'ютерної математики Mathcad і Maple	103
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	111
Розділ 3	Перехідні процеси в електричних колах під час дії вхідних збуджень складної форми	113
3.1	Одинична функція і перехідна характеристика кола	113
3.2	Перехідні процеси за дії східчастої напруги	118
3.3	Розрахунок перехідних процесів при довільних збудженнях	119
3.4	Імпульсна функція і імпульсна характеристика кола	124
3.5	Розрахунок перехідних процесів при довільних збудженнях з використанням імпульсної характеристики	126
3.6	Розрахунок перехідних процесів за допомогою перехідних та імпульсних характеристик кола через інтеграл Дюамеля в програмах Mathcad і Maple	128
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	145
Розділ 4	Частотний метод розрахунку перехідних процесів	147
4.1	Розрахунок перехідних процесів методом періо-	

дизації неперіодичних збуджень	147
4.2 Спектри періодичних і неперіодичних функцій ..	151
4.3 Використання перетворення Фур'є для розраху- нку перехідних процесів	157
4.4 Наближений спосіб розрахунку перехідних про- цесів частотним методом	160
4.5 Врахування ненульових початкових умов	163
4.6 Приклади використання різних методів розра- хунку перехідних процесів	166
4.6.1 Класичний метод	166
4.6.2 Операторний метод	171
4.6.3 Застосування інтеграла Дюамеля	175
4.6.3.1 Використання перехідної характе- ристики	175
4.6.3.2 Використання імпульсної характе- ристики	177
4.6.4 Метод періодизації неперіодичного збу- дження	179
4.6.5 Частотний метод	182
<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>187</i>

Розділ 5 Перехідні процеси в колах з розподіленими параметрами	189
5.1 Виникнення перехідних процесів в колах з роз- поділеними параметрами	189
5.2 Розв'язування телеграфних рівнянь однорідної довгої лінії класичним методом	190
5.3 Виникнення хвиль внаслідок під'єднання довгої лінії до джерела постійної напруги	196
5.4 Пряма хвиля, що утворюється внаслідок під'- єднання до лінії довільного джерела	200
5.5 Відбиття хвилі від кінця довгої лінії	209
5.6 Відбиття хвилі від кінця довільно навантаженої лінії	213
5.7 Відбиття та заломлення хвиль в точці спряження	

	двох однорідних ліній	220
5.8	Багаторазове відбиття хвиль із прямокутним фронтом	230
5.9	Перехідні процеси при ненульових початкових умовах	246
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	255

Синтез лінійних кіл

Розділ 6	Основи синтезу лінійних двополюсників	258
6.1	Основні етапи синтезу електричних кіл	258
6.2	Властивості вхідних функцій двополюсників	259
6.3	Перевірка вхідної функції на умови реалізації	264
6.4	Найпростіші вхідні функції і їх реалізація	270
6.5	Синтез двополюсників розкладанням вхідної функції на прості дроби	272
6.6	Синтез двополюсників поданням вхідної функції у вигляді неперервних дробів	278
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	285

Електричні та магнітні нелінійні кола

Розділ 7	Загальна характеристика нелінійних електричних кіл	288
7.1	Основні поняття і означення	288
7.2	Аналітичне подання характеристик нелінійних елементів	293
	7.2.1 Метод інтерполяції	294
	7.2.2 Метод найменших квадратів	299
	7.2.3 Метод кусково-лінійної апроксимації	301
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	303
Розділ 8	Методи розрахунку нелінійних кіл постійного струму	304
8.1	Графічні методи розрахунку	304
	8.1.1 Найпростіші схеми з'єднання нелінійних	

	опорів	304
	8.1.2 Метод еквівалентного генератора	309
	8.1.3 Метод двох вузлів	311
8.2	Графоаналітичний метод: метод лінеаризації . . .	314
8.3	Аналітичний метод	316
8.4	Аналіз нелінійних кіл постійного струму в математичній системі Mathcad	320
	8.4.1 Метод нелінійного еквівалентного генератора	327
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>333</i>
Розділ 9	Магнітні кола постійного струму	334
9.1	Загальна характеристика властивостей магнітних матеріалів	334
9.2	Основні закони та особливості магнітних кіл . . .	336
9.3	Розрахунок нерозгалужених магнітних кіл	340
9.4	Розрахунок розгалужених магнітних кіл	348
9.5	Аналіз магнітних кіл постійного струму в математичній системі Mathcad	353
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>368</i>
Розділ 10	Методи розрахунку нелінійних кіл змінного струму	369
10.1	Особливості аналізу нелінійних кіл змінного струму	369
10.2	Метод еквівалентних синусоїд	372
10.3	Котушка з феромагнітним осердям	376
10.4	Ферорезонанси	382
10.5	Трансформатор з феромагнітним осердям	390
10.6	Метод гармонічної лінеаризації	400
10.7	Метод гармонічного балансу	404
10.8	Метод малого параметра	410
10.9	Метод кусково-лінійної апроксимації (метод припасовування)	417

10.10	Випрямлення змінного струму	418
10.10.1	Напівпровідникові діоди	418
10.10.2	Однопівперіодний випрямляч змінного струму	420
10.10.3	Мостовий випрямляч	422
10.10.4	Однопівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром	426
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>434</i>
Розділ 11	Перехідні процеси в нелінійних електричних колах	436
11.1	Метод умовної лінеаризації	436
11.2	Метод кусково-лінійної апроксимації	444
11.3	Метод графічного інтегрування	450
11.4	Метод малого параметра	455
11.5	Числові методи розрахунку перехідних процесів	459
11.6	Метод рівнянь стану	466
11.7	Стійкість станів рівноваги в нелінійних колах	474
11.8	Визначення стійкості станів рівноваги методом фазових траєкторій	486
11.9	Автоколивання	494
11.10	Аналіз перехідних процесів в нелінійних електричних колах засобами математичної системи Mathcad	497
	<i>Запитання для самоперевірки</i>	<i>521</i>
	Література	523
	Предметний покажчик	525

Передмова

В підручнику, який складається з одинадцяти розділів, розглядаються методи розрахунку перехідних процесів в лінійних колах із зосередженими і розподіленими параметрами, синтез лінійних електричних кіл, усталені режими роботи й перехідні процеси в нелінійних електричних і магнітних колах.

Так, *в першому* розділі розкрито основні поняття перехідних процесів в лінійних електричних колах із зосередженими параметрами, а також наведено класичний метод їх розрахунку.

В *другому, третьому і четвертому* розділах розглянуто операторний і частотний методи аналізу перехідних процесів та метод розрахунку за допомогою перехідних (імпульсних) характеристик і інтеграла Дюамеля.

В *п'ятому* розділі увагу прикуто до основних методів розрахунку і аналізу перехідних процесів в лінійних колах з розподіленими параметрами.

Шостий розділ присвячений синтезу лінійних електричних кіл, зокрема синтезу лінійних двополюсників.

Починаючи з *сьомого* розділу, вивчаються нелінійні електричні та магнітні кола. В цьому розділі дається загальна характеристика нелінійних кіл.

У *восьмому і дев'ятому* розділах наводяться основні методи розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл постійного струму, відповідно.

В *десятому* розділі викладаються базові методи розрахунку нелінійних електричних кіл змінного струму.

В *одинадцятomu* розділі розглядаються перехідні процеси в нелінійних електричних колах і наводяться основні методи їх аналізу.

Для полегшення розуміння і засвоєння курсу основні положення теорії в кожному розділі супроводжуються численними прикладами з докладними числовими розв'язками, якісними графічними ілюстраціями та застосуванням сучасного програмного забезпечення, що дозволяє здійснювати автоматизацію розрахун-

ку, аналізу і моделювання розв'язуваних задач. При цьому залучено поширені на сьогодні системи комп'ютерної математики – програмні комплекси Mathcad та Maple.

Автори підручника висловлюють щирю й глибоку подяку шановним професору, доктору технічних наук, 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 6.050701 – “Електротехніка та електротехнології”, 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. Видолубу за критичні зауваження, рекомендації і слушні побажання, висунуті під час рецензування підручника, врахування яких, безумовно, поліпшило якість викладеного матеріалу.

Автори

*Перехідні процеси
в лінійних колах*

ВСТУП

Якщо в електричному колі електрорушійні сили (е.р.с.) джерел енергії є постійними або періодичними функціями часу, а струми і напруги віток кола також або залишаються постійними, або змінюються у часі періодично, то такий режим роботи електричного кола називають *усталеним*. Проте появи нового усталеного режиму зазвичай передує *перехідний процес*, за якого струми і напруги є неперіодичними. Перехідний процес виникає переважно внаслідок примусової зміни параметрів елементів кола або його структури і триває певний час (допоки не наступить новий усталений режим). Будь-які зміни параметрів елементів кола або його структури називають *комутацією*. Вважають, що комутація, тобто вмикання, розмикання або перемикування в колі, відбувається миттєво.

Виникнення перехідного процесу пов'язано з тим, що кожному усталеному стану кола відповідає деякий запас енергії електричних і магнітних полів. Перехід до нового усталеного режиму пов'язаний із зміною енергії в цих полях. Миттєво такі зміни енергії відбутися не можуть, оскільки це відповідало би наявності джерел безмежно великої потужності, що фізично неможливо. Дійсно, якщо в початковому усталеному режимі кількість енергії в електричному колі була W_1 , а в новому усталеному режимі – W_2 , причому ця зміна енергії відбулася за час Δt , то потужність джерел можна визначити за допомогою виразу $p = \frac{W_2 - W_1}{\Delta t}$. Якщо

допустити, що час Δt прямує до нуля, тобто перехідний процес відсутній, то це відповідає безмежно великій потужності, що, як говорилось вище, фізично неможливо, а відповідно припущення про відсутність перехідного процесу є помилковим.

В електричних колах енергія накопичується в електричних полях конденсаторів і магнітних полях котушок, тому в колах, які містять тільки резистори, перехід від одного усталеного стану до іншого відбувається миттєво. Проте в будь-яких реальних електричних пристроях завжди є електричні і магнітні поля, що дає

право стверджувати про існування перехідних процесів в будь-яких реальних електричних колах.

Незважаючи на відносно малий реальний час перебігу перехідних процесів, їх аналіз і розрахунок мають практичний інтерес, оскільки під час перехідних процесів в колах можуть виникати небезпечно великі напруги чи струми.

Та обставина, що енергія в електричних колах не може змінитися миттєво, дає підставу та можливість сформулювати два закони, які отримали назву *законів комутації*.

Енергія магнітного поля визначається за допомогою виразу

$$W_M = \frac{Li_L^2}{2},$$
 де i_L – струм через індуктивність. Оскільки W_M не може змінитися стрибком (миттєво), то й струм через індуктивність також не змінюється миттєво.

Енергія електричного поля визначається за допомогою виразу

Перший закон комутації формулюється так:
струм через індуктивність в початковий момент часу після комутації залишається таким же, яким він був безпосередньо перед комутацією.

Момент комутації приймають за початок відліку часу перехідного процесу. Вважають, що комутація відбувається в момент часу $t = 0$. Якщо першу мить часу після комутації позначити через $t = 0_+$, а останню мить безпосередньо перед комутацією як $t = 0_-$, то перший закон комутації можна записати математично

$$i_L(0_+) = i_L(0_-). \quad (1)$$

Енергія електричного поля $W_e = \frac{Cu_C^2}{2}$, де u_C – напруга на ємності.

Аналогічно сформулюємо *другий закон комутації*:
напруга на ємності в початковий момент після комутації дорівнює напрузі на ємності безпосередньо перед комутацією.

В математичному вигляді

$$u_C(0_+) = u_C(0_-). \quad (2)$$

Інші струми і напруги електричного кола в момент комутації можуть змінюватися стрибком.

Розділ 1

КЛАСИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Вмикання кола r, L на постійну напругу

Розглянемо вмикання кола, яке складається із послідовно з'єднаних резистора і індуктивності, до джерела постійної напруги (рис. 1.1). Після замикання ключа в колі виникає змінний неперіодичний струм i .

Складемо рівняння за другим законом Кірхгофа

$$L \frac{di}{dt} + ri = U. \quad (1.1)$$

Одержаний вираз є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку з сталими коефіцієнтами. Як відомо, повний розв'язок цього рівняння

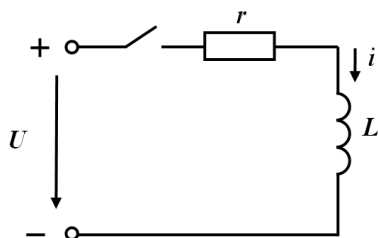


Рисунок 1.1

складається з суми частинного розв'язку неоднорідного рівняння і загального розв'язку однорідного рівняння.

Частинний розв'язок диференціального рівняння визначається його правою

частиною і називається *примусовою складовою* i_{np} .

Загальний розв'язок не залежить від прикладеної напруги, але залежить від параметрів кола та початкових умов. Його називають *вільною складовою* i_v .

Таким чином,

$$i = i_{np} + i_v. \quad (1.2)$$

Оскільки права частина рівняння (1.1) є сталою величиною, то примусова складова теж величина стала

$$i_{np} = I, \quad (1.3)$$

яка і є частинним розв'язком рівняння (1.1).

Підставляючи (1.3) в (1.1), одержуємо

$$L \frac{dI}{dt} + rI = U$$

або

$$rI = U,$$

оскільки $\frac{dI}{dt} = 0$, звідки

$$i_{np} = I = \frac{U}{r}. \quad (1.4)$$

Якщо розглянути новий усталений режим в колі, то в ньому протікає постійний струм, величина якого визначається з виразу

$$I = \frac{U}{r},$$

оскільки опір індуктивності постійному струму дорівнює нулю. Звідси видно, що примусову складову можна визначити також із розрахунку нового усталеного режиму.

Вільна складова є розв'язком однорідного диференціального рівняння

$$L \frac{di_e}{dt} + ri_e = 0. \quad (1.5)$$

Звідси

$$i_e = Ae^{pt}, \quad (1.6)$$

де A – стала інтегрування,

p – корінь характеристичного рівняння.

Для знаходження p записуємо *характеристичне рівняння*,

для чого в (1.5) $\frac{di_e}{dt}$ замінюємо на p , а i_e – на одиницю. Відтак

$$Lp + r = 0, \quad p = -\frac{r}{L}. \quad (1.7)$$

Повний розв'язок рівняння (1.5) з врахуванням знайдених примусової (1.4) і вільної (1.6) складових має вигляд

$$i = \frac{U}{r} + Ae^{-\frac{r}{L}t}, \quad (1.8)$$

де A є невідомою сталою.

Для визначення сталої інтегрування A скористаємося *початковими умовами*, тобто значеннями струму для $t = 0_+$ ($i(0_+)$). Оскільки струм i проходить через індуктивність, то він підпорядковується закону комутації $i(0_+) = i(0_-)$. Значення струму $i(0_-)$ відповідає значенню струму в момент, що безпосередньо передє комутації, тобто коли ключ був розімкнутий. При розімкнутому ключі струму в колі не було ($i(0_-) = 0$), тому $i(0_-) = i(0_+) = 0$.

Підставляючи значення $t = 0$ і $i(0) = 0$ в (1.8), отримуємо $0 = \frac{U}{r} + A$, звідки

$$A = -\frac{U}{r}. \quad (1.9)$$

Таким чином, вільна складова $i_g = -\frac{U}{r}e^{-\frac{r}{L}t}$ і струм перехідного процесу

$$i = \frac{U}{r} - \frac{U}{r}e^{-\frac{r}{L}t} = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right). \quad (1.10)$$

Побудуємо графік струму перехідного процесу (i), показавши окремо примусову і вільну складові (рис. 1.2).

Показник степеня є величиною безрозмірною, тому величина $\frac{r}{L}$ має розмірність $\frac{1}{\text{с}}$, $\frac{L}{r}$ – розмірність часу. Позначимо

$$\frac{L}{r} = \tau \quad (1.11)$$

і назвемо цю величину *сталю часу*.

Тоді вільна складова струму $i_g = -\frac{U}{r}e^{-\frac{t}{\tau}}$.

Для побудови вільної складової будемо задавати значення t , кратні τ , і одержимо таблицю 1.1 або в числових значеннях – таблицю 1.2.

Таблиця 1.1

t	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
i_e	$-\frac{U}{r}$	$-\frac{U}{r}e^{-1}$	$-\frac{U}{r}e^{-2}$	$-\frac{U}{r}e^{-3}$	$-\frac{U}{r}e^{-4}$	$-\frac{U}{r}e^{-5}$

Таблиця 1.2

t	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
i_e	$-\frac{U}{r}$	$-0,368\frac{U}{r}$	$-0,135\frac{U}{r}$	$-0,05\frac{U}{r}$	$-0,0183\frac{U}{r}$	$-0,0067\frac{U}{r}$

Побудована згідно з цими даними крива i_e , примусова складова i_{np} (1.4), а також повний розв'язок, який дорівнює їх сумі, зображені на рис. 1.2.

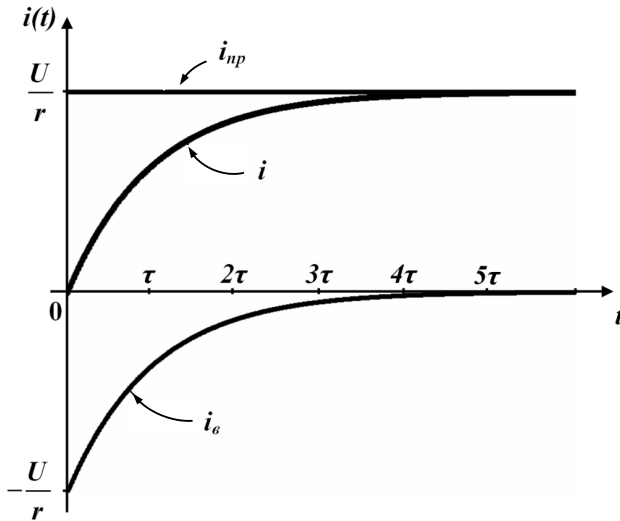


Рисунок 1.2

З графіка видно, що струм перехідного процесу з перебігом часу асимптотично наближається до свого усталеного значення i_{np} , а вільна складова практично перетворюється на нуль вже за час $t = (4 \div 5)\tau$. Тому за *практичну тривалість* перехідного процесу зазвичай приймають проміжок часу, що складає $(4 \div 5)\tau$.

Отже, стала часу τ електричного кола визначає практичну тривалість перехідного процесу.

1.2 Вмикання кола r, C на постійну напругу

Розглянемо перехідний процес в колі (рис. 1.3) при вмиканні його до джерела постійної напруги.

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для кола після замикання ключа (післякомутаційний стан)

$$ri + \frac{1}{C} \int idt = U. \quad (1.12)$$

Щоб із (1.12) одержати диференціальне рівняння, його треба продиференціювати за часом

$$r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0,$$

проте в цьому випадку шуканою змінною буде струм i , який не

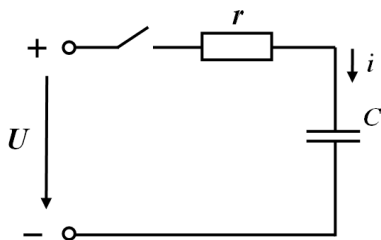


Рисунок 1.3

підпорядковується законам комутації і відповідно при знаходженні початкових умов для визначення сталої інтегрування зустрінуться деякі труднощі. Тому зручніше за змінну вибирати таку величину, щоб для неї виконувався закон комутації. В нашому випадку краще

знаходити напругу на ємності u_C . Враховуючи те, що струм і напруга на ємності взаємопов'язані співвідношенням

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (1.13)$$

і підставляючи (1.13) в (1.12), одержимо

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = U. \quad (1.14)$$

Як і в попередньому підрозділі, одержано неоднорідне диференціальне рівняння. Його повний розв'язок запишемо у вигляді суми примусової і вільної складових

$$u_C = u_{Cnp} + u_{C\theta}. \quad (1.15)$$

Примусова складова знаходиться із розрахунку нового усталеного режиму. В новому усталеному режимі, коли перехідний процес вже закінчився, струму в колі не буде, оскільки ємність для постійного струму являє собою безмежно великий опір. Напруга на резисторі також дорівнює нулю. Отже, в усталеному режимі відповідно до другого закону Кірхгофа напруга на ємності дорівнює прикладеній напрузі

$$u_{Cnp} = U. \quad (1.16)$$

Вільна складова має такий самий вигляд, як і в попередньому випадку, тобто

$$u_{C\theta} = Ae^{pt}. \quad (1.17)$$

Характеристичне рівняння запишемо за диференціальним рівнянням (1.14)

$$rCp + 1 = 0 \quad \text{і} \quad p = -\frac{1}{rC}. \quad (1.18)$$

Таким чином, повний розв'язок

$$u_C = U + Ae^{-\frac{1}{rC}t}. \quad (1.19)$$

Для визначення сталої інтегрування A знаходимо початкові умови. Напруга на ємності підпорядковується закону комутації

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

До комутації коло було розімкнуте і, якщо допустити, що конденсатор не був попередньо зарядженим, то

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0. \quad (1.20)$$

Підставляючи значення $t = 0$ і $u_C(0) = 0$ в (1.19), одержуємо

$$0 = U + A.$$

Звідки

$$A = -U.$$

Таким чином, повний розв'язок

$$u_C = U - Ue^{-\frac{1}{rC}t}. \quad (1.21)$$

Стала часу в загальному випадку може бути записана в такому вигляді:

$$\tau = \frac{1}{|p|}, \quad (1.22)$$

тому $\tau = rC$.

Побудуємо графік аналогічно попередньому прикладу і одержимо криву зміни напруги на ємності u_C від часу (рис. 1.4).

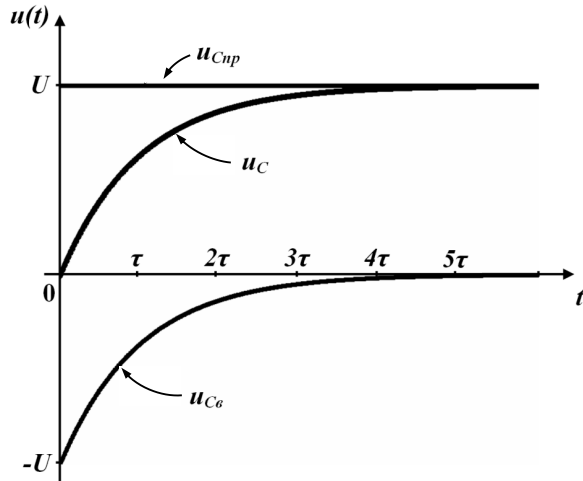


Рисунок 1.4

Знайдемо закон зміни струму в даному колі. Для цього використаємо вираз (1.13), який встановлює взаємозв'язок між стру-

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле : підруч. [для студентів вищих навч. закл.] / Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 407 с.
2. Карпов Ю. О. Конспект лекцій з курсу “Теоретичні основи електротехніки”. Ч. 1 / Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г. – Вінниця : ВПІ, 1992. – 176 с.
3. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Ч. 2 : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 191 с.
4. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних електричних колах : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Ведміцький Ю. Г. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 159 с.
5. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Розділ “Нелінійні електричні і магнітні кола” : [навчальн. посіб.] / Карпов Ю. О., Магас Т. Є. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 134 с.
6. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Розділ “Електричні кола з розподіленими параметрами” : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О., Мадьяров В. Г. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 102 с.
7. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Практикум : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О., Говор І. К., Ведміцький Ю. Г., Логіненко В. А. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 73 с.
8. Каців С. Ш. Комп’ютерне моделювання електричних кіл : [лаб. практи.] / Каців С. Ш., Мадьяров В. Г., Говор І. К. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 89 с.
9. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електричне поле : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О., Кухарчук В. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 143 с.
10. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Магнітне та електромагнітне поля : [навч. посіб.] / Карпов Ю. О.,

Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.

Рекомендована

1. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола : підруч. / Перхач В. С. – К. : Вища школа, 1992. – 439 с.
2. Теоретичні основи електротехніки. [у 3-х т.] : підруч. [для студ. техн. спец. вищ. закл. освіти]. Т.1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / Бойко В. С. [та ін.] ; заг. ред. І. М. Чиженко, В. С. Бойко – К. : Політехніка, 2004. – 272 с.
3. Теоретичні основи електротехніки. [у 3-х т.] : підруч. [для студ. техн. спец. вищ. закл. освіти]. Т. 2. Перехідні процеси у лінійних колах із зосередженими параметрами. Нелінійні та магнітні кола / Бойко В. С. [та ін.] ; заг. ред. І. М. Чиженко, В. С. Бойко – К. : НТУУ “КПІ”, 2008. – 224 с.
4. Теоретические основы электротехники. [в 3-х т.] Т. 1 : [учеб. для вузов] / Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровин Н. В., Чечурин В. Л. – СПб : Питер, 2003. – 463 с.
5. Теоретические основы электротехники. [в 3-х т.] Т. 2: [учеб. для вузов] / Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровин Н. В., Чечурин В. Л. – СПб : Питер, 2003. – 576 с.
6. Основы теории цепей : [учеб. для вузов] / Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нутушил А. В., Страхов С. В. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
7. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники / Атабеков Г. И. – М. : Энергия, 1978. – 280 с.
8. Теоретические основы электротехники / под ред. проф. П. А. Ионкина. – М. : Высшая школа, 1978. – 543 с.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Бессонов Л. А. – М. : Высшая школа, 1973. – 750 с.
10. Теоретичні основи електротехніки : [підруч.] / Г. П. Балан, П. О. Кравченко, Ю. Ф. Свєргун, О. Є. Щєрбаков – К. : Інтас, 2007. – 325 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

автоколивання, 494
аналогія, 339
апроксимація
 характеристик, 294
 кусково-лінійна, 301
атрактор, 520

Б

баланс потужностей, 326

В

випрямляч, 418
 мостовий, 422
 однопівперіодний, 420
 з ємнісним фільтром, 426
відбиття хвилі, 209
багаторазове, 230

втрата

в сталі, 380
на вихрові струми, 380
на гістерезис, 379

вузол, 518

Г

гістерезис, 334

Д

двополюсник, 258
декремент коливань, 39
діаграма
 векторна
 катушки, 379, 381
 трансформатора, 394
 руху, 234
діод напівпровідниковий, 418
 ідеальний, 420

дріб

простий, 272
неперервний, 278

Е

елементи електричного кола
 нелінійні, 289
 керовані, 290
енергія
 електричного поля, 13, 199
 магнітного поля, 13, 199
ефект тригерний, 386

Є

ємність
 динамічна, 292
 статична, 291

З

задача Коші, 68, 190

закон(и)

електромагнітної індукції,
392

Кірхгофа

в операторній формі, 84
для магнітних кіл
 другий, 339
 перший, 340
комутації, 13
 загальні, 64, 67
Ома в операторній формі,
84
повного струму, 336
заломлення хвиль, 220
з'єднання елементів
 змішане, 308

паралельне, 307, 386
послідовне, 305, 382
змінні стану, 466
значення діюче, 421, 432
зображення функції, 78

I

індуктивність
динамічна, 292
статична, 291

індукція
залишкова, 335
магнітна, 334

інтеграл
Дюамеля, 121, 127
накладання, 121, 127

K

коефіцієнт(и)
відбиття, 211
ефективності, 421
заломлення, 223
ряду Фур'є, 151
трансформації, 393

коливання
вільні, 39
згасаючі, 517
квазіперіодичні, 520
незгасаючі, 519

коло(а)
електричні
лінійні, 288
нелінійні, 288
магнітне, 334
нерозгалужене, 340
розгалужене, 348
початкове, 304

комутація, 12
катушка індуктивності
з феромагнітним осердям,
376

крива намагнічування основ-
на, 335

критерій стійкості, 478
крок інтегрування, 459

L

лінія
без втрат, 191
довга, 190

M

метод(и)
алгебризації диференціаль-
них рівнянь, 56
аналітичний, 316
вхідного опору, 58
гармонічного балансу, 404
гармонічної лінеаризації,
400
графічні, 304
графічного інтегрування,
450
графоаналітичний, 314
двох вузлів, 311, 350, 353
Ейлера прямий, 460, 467
еквівалентних синусоїд,
372
еквівалентного генератора,
309
інтерполяції, 294
класичний, 44
кусково-лінійної апрокси-
мації, 301, 417, 444

лінеаризації, 314
малого параметра, 410, 455
найменших квадратів, 299
нелінійного еквівалентного генератора, 327
Ньютона - Рафсона, 316
операторний, 77
періодизації неперіодичного збудження, 179
припасовування, 417
Пуанкаре, 410
рівнянь стану, 466
умовної лінеаризації, 436
фазових траєкторій, 486
частотний, 147, 182
числові, 459
якісні, 486

Н

напруга

магнітна, 339
східча, 115, 118, 120

напруженість магнітного поля, 334

нулі функції, 260

О

область притягання, 519

опір

двополюсника, 260
динамічний, 292
діода, 419
операторний, 85
статичний, 291
хвильовий, 195

оригінал функції, 77

П

параметри

динамічні, 292
первинні, 190
статичні, 291

перетворення

Лапласа, 77
Фур'є, 156

петля гістерезису, 334

гранична, 334
часткова, 334

поліном Гурвіца, 264

полюси функції, 260

потік магнітний, 336

основний, 336, 376, 390
розсіювання, 336, 376, 391

потокочеплення, 289

правило

правого гвинта, 336, 339

принцип

накладання, 113, 147, 293,
369

неперервності, 336

проникність магнітна

абсолютна, 335
відносна, 335

простір фазовий, 487

процес

перехідний, 12
практична тривалість,
18, 189, 514

Р

режим

аперіодичний, 43
граничний, 43
коливальний, 40

короткого замикання, 213,
244, 397
критичний, 44
періодичний, 40
усталений, 12, 520
 стійкий, 475
холостого ходу, 212, 397
рівняння
 характеристичне, 15, 36
 хвильове, 191, 192
рівняння
 довгої лінії, 190
 стану, 466
 телеграфні, 190
 трансформатора, 392
ряд Фур'є, 149
С
сила
 коерцитивна, 335
 магніторушійна, 339
 намагнічувальна, 339
синтез, 258
синусоїда еквівалентна, 372
сідло, 518
складова
 вільна, 14
 примусова, 14
спектр, 156
 амплітудно-частотний, 153
 дискретний, 154
 лінійний, 154
 неперервний, 155
 фазовий, 154
стан рівноваги, 474, 477, 518
 динамічний, 497, 519
 нестійкий, 477, 494, 518
 стаціонарний, 520
 стійкий, 475, 477, 518
стала(і)
 інтегрування, 15, 37, 46
 магнітна, 335
 часу, 16
стійкість
 в малому, 475
 у великому, 475
струм(и)
 вихрові, 380
 втрат, 380
 намагнічування, 380
 Фуко, 380
схема
 еквівалентна, 204, 214, 343
 заміщення
 котушки, 380
 трансформатора, 396
 операторна, 92
Т
теорема
 зсуву, 81
 Ляпунова, 477
 про запізнення, 81
 розкладання, 97
тиристор, 425
точка
 зображувальна, 488
 нерухома, 518
 образотворча, 488
 робоча, 304
траєкторія фазова, 487, 489
трансформатор, 390

У

умови

- початкові, 16
- залежні, 31
- незалежні, 31
- нульові, 114
- реалізації, 264

Ф

ферорезонанс

- напруг, 384
- струмів, 387

фізична величина

- керуюча, 290

фільтр

- емнісний, 426
- нижніх частот, 426

фокус, 518

форма нормальна, 466

формування хвилі

- зворотної, 196
- прямої, 196

формула

- Ейлера пряма, 460
- розкладання, 97

фронт хвилі, 197

функція(ї)

- вхідна, 258
- Дірака, 124
- додатна дійсна, 261
- одинична імпульсна, 124
- одинична східчаста, 113
- Хевісайда, 113
- Штурма, 266

Х

хаос детермінований, 520

характеристика(и)

- вебер-амперна, 289, 344
- вольт-амперна, 289
- імпульсна, 124
- кулон-вольтна, 289
- монотонна, 289
- нелінійних елементів, 288
- немонотонна, 289
- неоднозначна, 289
- несиметрична, 289
- однозначна, 289
- перехідна, 114
- симетрична, 289
- спектральна, 156

хвиля

- заломлена, 222
- зворотна, 194, 196
- напруги, 194
- пряма, 194, 196
- струму, 196

Ц

цикл граничний, 518

Ч

частота кутова, 39

Ш

швидкість

- фазова, 488
- хвилі, 191, 194

шихтування осердя, 380

Я

явища

- нелінійні, 292
- ферорезонансні, 382

Навчальне видання

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

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ
СИНТЕЗ ЛІНІЙНИХ КІЛ
ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ НЕЛІНІЙНІ КОЛА**

Підручник

Редактор О. Скалоцька

Оригінал-макет підготовлено Ю. Ведміцьким

Підписано до друку 35040233" 0

Формат 29,7 × 42 ¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 30,61

Наклад 722*3/ " "3/372+прим. Зам. № 4233/3; 6

Вінницький національний технічний університет,

ø " / " 0'

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.