

621.3

Т33

КАРПОВ Ю.О., ВЕДМІЦЬКИЙ Ю.Г.,  
КУХАРЧУК В.В., КАЦІВ С.Ш.

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

**Перехідні процеси  
в лінійних колах**

**Синтез лінійних кіл**

**Електричні та магнітні  
нелінійні кола**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

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

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

---

---

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

СИНТЕЗ

НЕЛІНІЙНІ КОЛА

Підручник

*За редакцією професора Ю. О. Карпова*

Стереотипне видання

Херсон  
ОЛДІ-ПЛЮС  
2019

**УДК 621.3(075)**  
**ББК 31.211я73**  
**ТЗЗ**

*Копіювання, сканування, запис на електронні носії і  
тому подібне, книжки в цілому, або будь-якої  
її частини заборонено*

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. Сібрук**, доктор технічних наук, професор

*За редакцією професора Ю. О. Карпова*

**Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. та інші**

**ТЗЗ** Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук та ін.; за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Стереотип, вид. – Херсон : ОЛДІ–ПЛЮС, 2019. – 456 с.

**ISBN 978-966-289-005-1**

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 усталених 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 978-966-289-005-1**

© Ю. Карпов, Ю. Ведміцький, В. Кухарчук, С. Каців, 2019

Зміст

Передмова.....	7
<b>ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ</b>	
ВСТУП.....	9
<b>Розділ 1 КЛАСИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ</b> .....	<b>11</b>
1.1 Вмикання кола $r, L$ на постійну напругу.....	11
1.2 Вмикання кола $r, C$ на постійну напругу.....	14
1.3 Відімкнення кола $r, L$ від джерела постійної напруги.....	18
1.4 Під'єднання кола $r, L$ до джерела синусоїдної напруги.....	20
1.5 Перехідний процес в розгалужених колах, що містять один реактивний елемент.....	23
1.6 Незалежні і залежні початкові умови.....	26
1.7 Під'єднання кола з елементами $r, L, C$ до джерела постійної напруги.....	30
1.8 Розрахунок перехідних процесів в складних розгалужених колах.....	37
1.9 Методи складання характеристичних рівнянь.....	47
1.9.1 Метод алгебризації диференціальних рівнянь.....	47
1.9.2 Метод вхідного опору.....	49
1.10 Закони комутації в узагальненій формі.....	52
1.11 Розрахунок перехідних процесів класичним методом за допомогою програм комп'ютерної математики. Система Maple.....	56
Запитання для самоперевірки.....	63
<b>Розділ 2 ОПЕРАТОРНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ</b> .....	<b>65</b>
2.1 Деякі властивості перетворення Лапласа.....	65
2.2 Використання перетворення Лапласа для розрахунку перехідних процесів.....	69
2.3 Закони Ома і Кірхгофа в операторній формі.....	71
2.4 Операторні схеми.....	77
2.5 Перехід від зображення до оригіналу.....	80
2.6 Розрахунок перехідних процесів операторним методом за допомогою програм комп'ютерної математики Mathcad і Maple.....	86
Запитання для самоперевірки.....	94
<b>Розділ 3 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПІД ЧАС ДІЇ ВХІДНИХ ЗБУДЖЕНЬ СКЛАДНОЇ ФОРМИ</b> .....	<b>95</b>
3.1 Одинична функція і перехідна характеристика кола.....	95
3.2 Перехідні процеси за дії східчастої напруги.....	99
3.3 Розрахунок перехідних процесів при довільних збудженнях.....	100
3.4 Імпульсна функція і імпульсна характеристика кола.....	104
3.5 Розрахунок перехідних процесів при довільних збудженнях з використанням імпульсної характеристики.....	106

3.6 Розрахунок перехідних процесів за допомогою перехідних та імпульсних характеристик кола через інтеграл Дюамеля в програмах Mathcad і Maple.....	108
Запитання для самоперевірки.....	123
<b>Розділ 4. ЧАСТОТНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ.....</b>	<b>125</b>
4.1 Розрахунок перехідних процесів методом періодизації неперіодичних збуджень.....	125
4.2 Спектри періодичних і неперіодичних функцій.....	129
4.3 Використання перетворення Фур'є для розрахунку перехідних процесів.....	134
4.4 Наближений спосіб розрахунку перехідних процесів частотним методом.....	136
4.5 Врахування ненульових початкових умов.....	139
4.6 Приклад використання різних методів розрахунку перехідних процесів	142
4.6.1 Класичний метод.....	142
4.6.2 Операторний метод.....	147
4.6.3 Застосування інтеграла Дюамеля.....	150
4.6.3.1 Використання перехідної характеристики.....	150
4.6.3.2 Використання імпульсної характеристики.....	151
4.6.4 Метод періодизації неперіодичного збудження.....	154
4.6.5 Частотний метод.....	156
Запитання для самоперевірки.....	161
<b>Розділ 5. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....</b>	<b>162</b>
5.1 Виникнення перехідних процесів в колах з розподіленими параметрами.....	162
5.2 Розв'язування телеграфних рівнянь однорідної довгої лінії класичним методом.....	162
5.3 Виникнення хвиль внаслідок під'єднання довгої лінії до джерела постійної напруги.....	168
5.4 Пряма хвиля, що утворюється внаслідок під'єднання до лінії довільного джерела.....	171
5.5 Відбиття хвилі від кінця довгої лінії.....	180
5.6 Відбиття хвилі від кінця довільно навантаженої лінії.....	183
5.7 Відбиття та заломлення хвиль в точці спряження двох однорідних ліній.....	189
5.8 Багаторазове відбиття хвиль із прямокутним фронтом.....	198
5.9 Перехідні процеси при ненульових початкових умовах.....	212
Запитання для самоперевірки.....	220

<b>СИНТЕЗ ЛІНІЙНИХ КІЛ</b>	
Розділ 6. <b>ОСНОВИ СИНТЕЗУ ЛІНІЙНИХ ДВОПОЛЮСНИКІВ</b> .....	223
6.1 Основні етапи синтезу електричних кіл.....	223
6.2 Властивості вхідних функцій двополюсників.....	223
6.3 Перевірка вхідної функції на умови реалізації.....	229
6.4 Найпростіші вхідні функції і їх реалізація.....	234
6.5 Синтез двополюсників розкладанням вхідної функції на прості дроби....	236
6.6 Синтез двополюсників поданням вхідної функції у вигляді неперервних дроби.....	241
Запитання для самоперевірки.....	247
<b>ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ НЕЛІНІЙНІ КОЛА</b>	
Розділ 7. <b>ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ</b> .....	249
7.1 Основні поняття і означення.....	249
7.2 Аналітичне подання характеристик нелінійних елементів.....	253
7.2.1 Метод інтерполяції.....	254
7.2.2 Метод найменших квадратів.....	258
7.2.3 Метод кусково-лінійної апроксимації.....	260
Запитання для самоперевірки.....	261
Розділ 8. <b>МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	262
8.1 Графічні методи розрахунку.....	262
8.1.1 Найпростіші схеми з'єднання нелінійних опорів.....	262
8.1.2 Метод еквівалентного генератора.....	267
8.1.3 Метод двох вузлів.....	268
8.2 Графоаналітичний метод: метод лінеаризації.....	271
8.3 Аналітичний метод.....	273
8.4 Аналіз нелінійних кіл постійного струму в математичній системі Mathcad.....	276
8.4.1 Метод нелінійного еквівалентного генератора.....	282
Запитання для самоперевірки.....	288
Розділ 9. <b>МАГНІТНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	289
9.1 Загальна характеристика властивостей магнітних матеріалів.....	289
9.2 Основні закони та особливості магнітних кіл.....	291
9.3 Розрахунок нерозгалужених магнітних кіл.....	294
9.4 Розрахунок розгалужених магнітних кіл.....	300
9.5 Аналіз магнітних кіл постійного струму в математичній системі Mathcad.....	304
Запитання для самоперевірки.....	317

<b>Розділ 10. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ</b> .....	318
10.1 Особливості аналізу нелінійних кіл змінного струму.....	318
10.2 Метод еквівалентних синусоїд.....	320
10.3 Котушка з феромагнітним осердям.....	323
10.4 Ферорезонанси.....	328
10.5 Трансформатор з феромагнітним осердям.....	335
10.6 Метод гармонічної лінеаризації.....	343
10.7 Метод гармонічного балансу.....	347
10.8 Метод малого параметра.....	352
10.9 Метод кусково-лінійної апроксимації (метод припасовування).....	358
10.10 Випрямлення змінного струму.....	359
10.10.1 Напівпровідникові діоди.....	359
10.10.2 Однопівперіодний випрямляч змінного струму.....	360
10.10.3 Мостовий випрямляч.....	362
10.10.4 Однопівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром.....	366
Запитання для самоперевірки.....	373
<b>Розділ 11. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ</b> .....	375
11.1 Метод умовної лінеаризації.....	375
11.2 Метод кусково-лінійної апроксимації.....	382
11.3 Метод графічного інтегрування.....	387
11.4 Метод малого параметра.....	391
11.5 Числові методи розрахунку перехідних процесів.....	394
11.6 Метод рівнянь стану.....	401
11.7 Стійкість станів рівноваги в нелінійних колах.....	409
11.8 Визначення стійкості станів рівноваги методом фазових траєкторій.....	419
11.9 Автоколивання.....	425
11.10 Аналіз перехідних процесів в нелінійних електричних колах засобами математичної системи Mathcad.....	428
Запитання для самоперевірки.....	449
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	450
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	452