

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Електротехніка та електричні машини»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

Частина 1

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Харків – 2012

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку

на засіданні кафедри “Електротехніка та електричні машини”
11 листопада 2010 р., протокол № 3.

Викладено рекомендації щодо проведення практичних
занять активним методом, наведені необхідні теоретичні
положення, приклади розрахунків, запропоновані контрольні
запитання для самоконтролю та задачі для самостійної роботи.

Методичні вказівки призначені для студентів денної
форми навчання спеціальностей “Електричний транспорт” та
“Електричні системи та комплекси транспортних засобів”, що
вивчають дисципліну “Теоретичні основи електротехніки”.

Укладачі:

доц. С.М. Тихонравов,
асист. О.Є. Зінченко,
доц. П.Я. Придубков

Рецензент

доц. А.А. Прилипко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

Частина 1

Електричні кола постійного струму

Відповідальний за випуск Тихонравов С.М.

Редактор Буранова Н.В.

Підписано до друку 12.05.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія
залізничного транспорту

61050, Харків - 50, майдан Фейсрбаха, 7

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

Загальні положення.....	5
Практичне заняття 1	
Еквівалентні перетворення схем з'єднання опорів.....	6
1 Вихідні дані та завдання.....	6
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	7
3 Приклад розрахунку.....	9
4 Контрольні запитання.....	11
Практичне заняття 2	
Розрахунок електричного кола з одним джерелом ЕРС.....	11
1 Вихідні дані та завдання.....	11
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	12
3 Приклад розрахунку.....	14
4 Контрольні запитання.....	18
Практичне заняття 3	
Розрахунок електричного кола з одним джерелом струму.....	19
1 Вихідні дані та завдання.....	19
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	19
3 Приклад розрахунку.....	21
4 Контрольні запитання.....	24
Практичне заняття 4	
Розрахунок складного електричного кола методом накладання.....	25
1 Вихідні дані та завдання.....	25
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	25
3 Приклад розрахунку.....	28
4 Контрольні запитання.....	32
Практичне заняття 5	
Розрахунок електричного кола методом контурних струмів.....	32
1 Вихідні дані та завдання.....	32
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	34
3 Приклад розрахунку.....	36
4 Контрольні запитання.....	37

Практичне заняття 6

Розрахунок електричного кола методом вузлових потенціалів.....	38
1 Вихідні дані та завдання.....	38
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	38
3 Приклад розрахунку.....	40
4 Контрольні запитання.....	43

Практичне заняття 7

Розрахунок електричного кола методом еквівалентного генератора.....	43
1 Вихідні дані та завдання.....	43
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	44
3 Приклад розрахунку.....	45
4 Контрольні запитання.....	47

Практичне заняття 8

Розрахунок електричного кола з нелінійними елементами.....	48
1 Вихідні дані та завдання.....	48
2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання.....	48
3 Приклад розрахунку.....	51
4 Контрольні запитання.....	52

Практичне заняття 9

Контрольне модульне тестування.....	52
1 Загальні положення.....	52
2 Тестові питання.....	53
Список літератури.....	55
Додаток А Основні електричні величини розділу «Електричні кола постійного струму».....	56

Загальні положення

Практичні заняття з теоретичних основ електротехніки під керівництвом викладача, що передбачені навчальним планом у першому семестрі у кількості 2 годин на тиждень, є важливою складовою навчального процесу і мають велике значення для успішного засвоєння дисципліни.

На практичних заняттях відбувається становлення професійного мислення майбутніх інженерів електротехнічного напрямку та основне закріплення складного теоретичного матеріалу.

Проведення практичних занять в активній формі з індивідуальним контролем кінцевих результатів спонукає студентів до самостійної творчої роботи.

Перший змістовий модуль дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” сягає за часом півсеместру і складається з таких розділів:

1 Основні поняття, визначення та закони теоретичної електротехніки.

2 Аналіз та розрахунок лінійних електричних кіл постійного струму.

3 Аналіз та розрахунок нелінійних електричних кіл постійного струму.

Календарний план практичних занять побудовано за схемою «від простого до складного». Кожне наступне заняття базується на ретельному вивченні теоретичного лекційного матеріалу та методів розрахунку попередніх задач.

Практичні заняття логічно ув'язані з планом лабораторних робіт, тому окремі розділи курсу більш ретельно вивчають на лабораторному практикумі з обов'язковим внесенням їх до контрольних питань модульного тестування, яке проводиться на останньому практичному занятті.

Для викладача дуже важливо з перших занять об'єктивно оцінити особисті індивідуальні можливості та загальну підготовку кожного студента для диференціації рівня складності завдань на самостійну роботу. Особливу увагу треба приділяти не тільки відстаючим, але й відмінникам. Для оптимального розвитку природних інтелектуальних здібностей треба

розв'язувати такі задачі, що забезпечують постійний достатньо високий рівень напруження творчих сил.

Варіанти схем та числових даних визначає викладач. Наприклад, за двозначним номером студента у журналі групи. За першою цифрою визначається номер варіанта з таблиці числових даних, а за другою – номер схеми з рисунка.

Конкретні задачі, електричні кола для розрахунку та їх числові дані, що наведені у даних методичних вказівках, треба розглядати як зразкові і базові. Викладач має змогу змінювати їх як у бік полегшення для відстаючих студентів, так і у бік ускладнення для забезпечення розвитку здібностей відмінників.

Для ефективного засвоєння матеріалу найбільш продуктивним є проведення практичних занять у формі багатоваріантних контрольних робіт з обов'язковою оцінкою, яка враховується при розрахунку загальної модульної оцінки кожного студента. На початку заняття викладач дає загальні рекомендації щодо виконання контрольної роботи з посиланням на відповідні розділи лекційного курсу, а потім, під час виконання роботи, відповідає на питання та допомагає кожному розібратися у тонкощах розрахунків.

Якщо якісь окремі питання набувають масового характеру, доцільно зупинити процес роботи і дати роз'яснення для всієї групи з обов'язковою фіксацією зроблених висновків у відповідних місцях конспектів лекцій.

Практичне заняття 1

Еквівалентні перетворення схем з'єднання опорів

1 Вихідні дані та завдання

Для електричного кола, зображеного на рисунку 1.1, визначити еквівалентний опір. Значення опорів резисторів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Варіант	Опори, Ом					
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	15	13	14	16	8	10
2	10	12	18	8	6	14
3	16	17	6	7	18	7
4	15	12	11	10	6	16
5	13	9	8	7	15	14
6	8	7	8	12	14	13
7	10	7	6	14	9	15
8	7	13	10	10	11	15
9	11	9	8	14	13	12
0	7	16	9	13	14	11

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «гілка», «вузол», «опір», «еквівалентне перетворення схеми», «послідовне», «паралельне» та «мішане» з'єднання опорів.

Для розрахунку електричних кіл їх відображають у вигляді електричних схем заміщення, на яких усі елементи навантаження представлені опорами. Лінія на схемі не має опору, тому будь-яку лінію можна стягнути у крапку і будь-яку крапку витягнути у лінію.

Загальний еквівалентний опір знаходять методом згортання схеми за формулами послідовного або паралельного з'єднання опорів, починаючи з найдалшої від джерела гілки.

Для більш наочного уявлення про перетворення схеми доцільно її перерисувати після кожного спрощення та заміни декількох опорів на один еквівалентний.

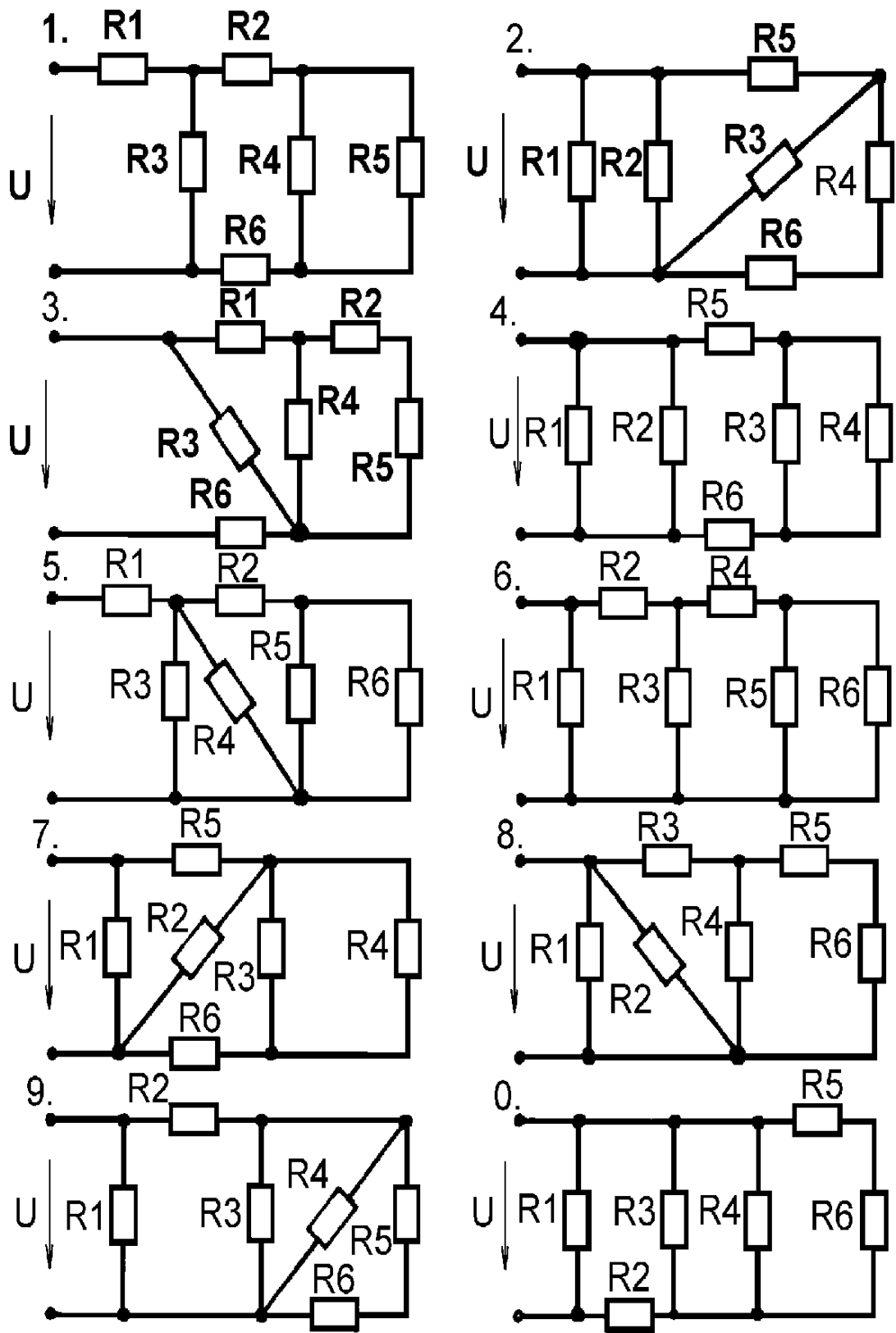


Рисунок 1.1

3 Приклад розрахунку

Нехай задана схема, що зображена на рисунку 1.2.

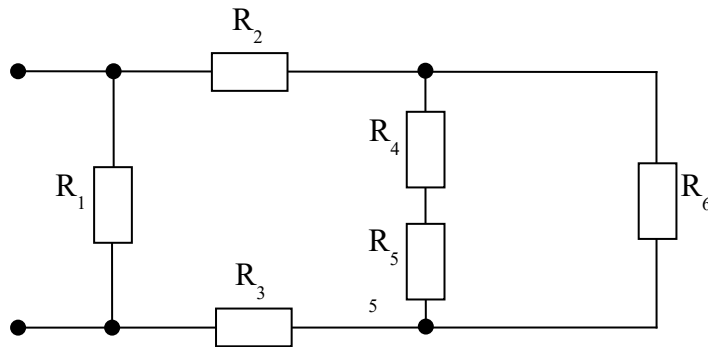


Рисунок 1.2

Вихідні дані: $R_1 = 12 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 7 \text{ Ом}$, $R_4 = 15 \text{ Ом}$, $R_5 = 9 \text{ Ом}$, $R_6 = 8 \text{ Ом}$.

Послідовність розрахунку:

1 Резистори R_4 та R_5 з'єднані послідовно, тому їх можна замінити еквівалентним, використовуючи формулу для послідовного з'єднання опорів (рисунок 1.3).

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 15 + 9 = 24 \text{ Ом.}$$

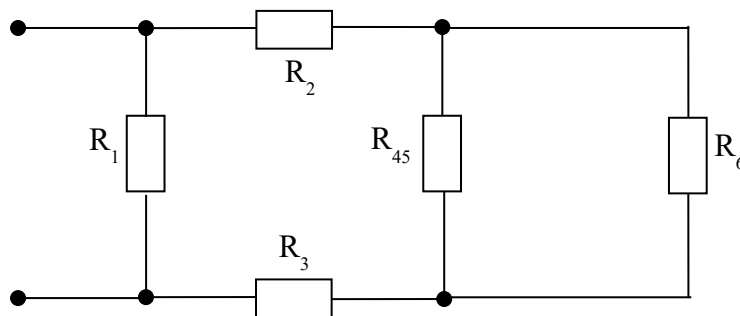


Рисунок 1.3

2 Резистори R_{45} та R_6 з'єднані паралельно, тому використовуємо формулу для паралельного з'єднання опорів (рисунок 1.4).

$$R_{456} = \frac{R_{45} \cdot R_6}{R_{45} + R_6} = \frac{24 \cdot 8}{24 + 8} = 6 \text{ Ом.}$$

3 Резистори R_2 , R_{456} та R_3 з'єднані послідовно, отже треба використати формулу для послідовного з'єднання опорів (рисунок 1.5).

$$R_{23456} = R_2 + R_3 + R_{456} = 10 + 7 + 6 = 23 \text{ Ом.}$$

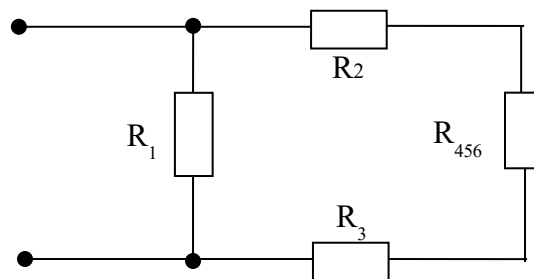


Рисунок 1.4

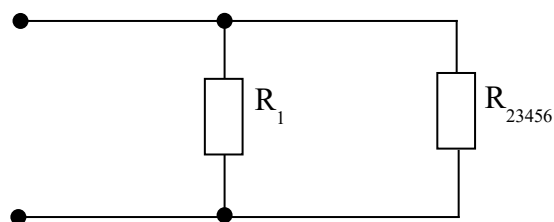


Рисунок 1.5

4 Резистори, що залишились, з'єднані паралельно, тому знайдемо еквівалентний опір схеми (рисунок 1.6).

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 \cdot R_{23456}}{R_1 + R_{23456}} = \frac{12 \cdot 23}{12 + 23} = 7,89 \text{ Ом.}$$

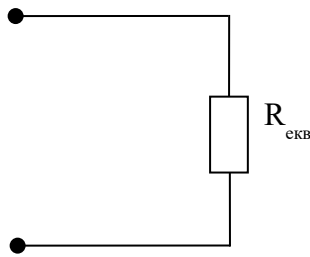


Рисунок 1.6

4 Контрольні запитання

- 1 Що таке електричний опір?
- 2 Як опір зображують на електричній схемі?
- 3 Яке перетворення енергії відбувається в електричному опорі?
- 4 Одиниця виміру електричного опору.
- 5 Яке з'єднання опорів називають послідовним?
- 6 Яке з'єднання опорів називають паралельним?
- 7 Дати визначення понять «гілка» та «вузол».
- 8 Як розрахувати еквівалентний опір при послідовному та паралельному з'єднанні?
- 9 Що таке мішане з'єднання опорів?
- 10 Як визначити загальний еквівалентний опір розгалуженого електричного кола?

Практичне заняття 2

Розрахунок електричного кола з одним джерелом ЕРС

1 Вихідні дані та завдання

Для електричних кіл, зображених на рисунку 2.1, визначити струми в усіх гілках, падіння напруги на опорах та перевірити розрахунок за першим та другим законами Кірхгофа. Числові значення ЕРС джерела та опорів резисторів наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Варіант Т	ЕРС, В	Опори, Ом					
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
1	100	6	8	9	4	8	10
2	200	11	12	18	8	10	14
3	150	16	17	6	7	18	7
4	170	12	12	11	10	6	16
5	190	13	9	8	7	15	12
6	140	8	7	8	12	14	13
7	180	10	7	6	14	9	15
8	120	7	13	10	10	11	15
9	110	11	9	8	7	5	12
0	160	15	16	9	13	14	11

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «джерело ЕРС», «струм», «падіння напруги», «контур» і вивчити закони Ома та Кірхгофа.

Позначаємо та нумеруємо струми в усіх гілках напрямком від плюса джерела до мінуса. Кількість невідомих струмів у колі дорівнює кількості гілок.

Щоб знайти першим струм у гілці з джерелом ЕРС за законом Ома для повного кола, треба згорнути схему за формулами послідовного та паралельного з'єднання та обчислити загальний еквівалентний опір відносно затискачів джерела.

Струми в інших гілках знаходять при послідовному розгортанні схеми у зворотному порядку, використовуючи струми, що вже обчислені. Для цього можна застосувати формули розкиду або закони Ома та Кірхгофа.

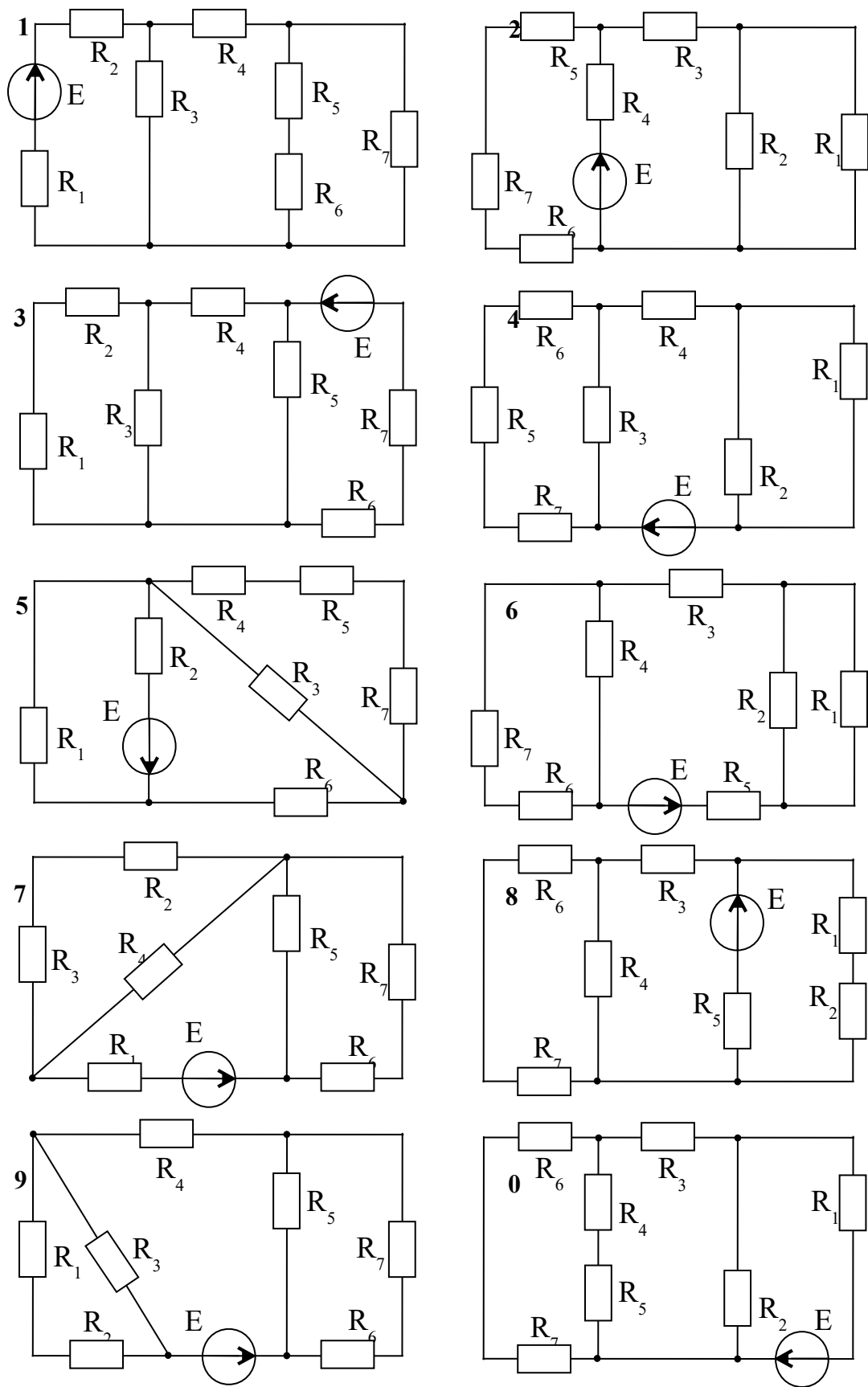


Рисунок 2.1

Формули розкиду дозволяють відразу знайти струми у паралельних гілках, якщо вже знайдено загальний струм, що надходить до вузла розгалуження.

Наприклад, якщо відомо значення струму I_1 та резисторів R_2 , R_3 (рисунок 2.2), то струми у паралельних гілках дорівнюють:

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad I_3 = \frac{I_1 \cdot R_2}{R_2 + R_3}.$$

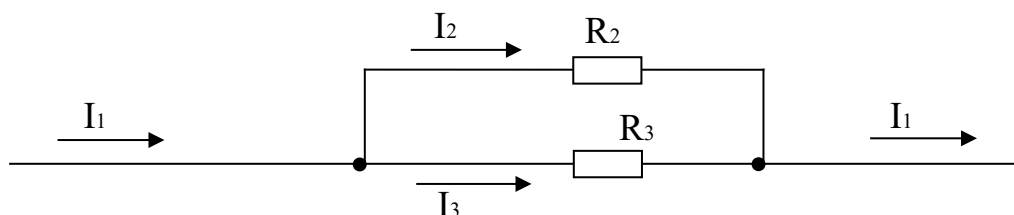


Рисунок 2.2

3 Приклад розрахунку

Нехай задана схема, що зображена на рисунку 2.3.

Вихідні дані: $E=50$ В, $R_1=12$ Ом, $R_2=10$ Ом, $R_3=7$ Ом, $R_4=15$ Ом, $R_5=9$ Ом, $R_6=8$ Ом.

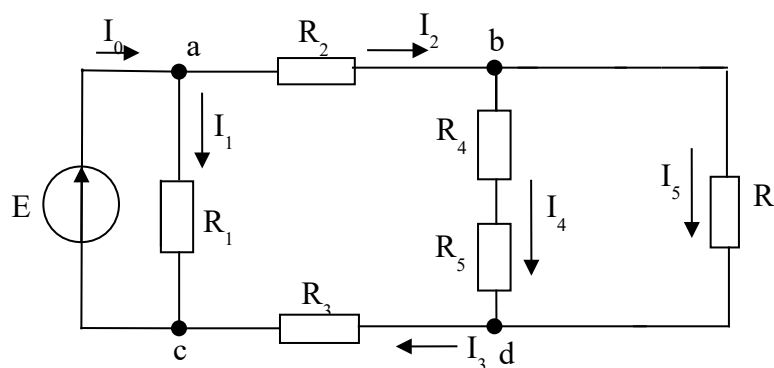


Рисунок 2.3

1 Задаємо дійсні напрямки струмів у всіх гілках від плюса джерела до мінуса і починаємо згортати схему шляхом еквівалентних перетворень.

Резистори R_4 та R_5 з'єднані послідовно, тому їх можна замінити еквівалентним, використовуючи формулу для послідовного з'єднання опорів (рисунок 2.4).

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 15 + 9 = 24 \text{ Ом.}$$

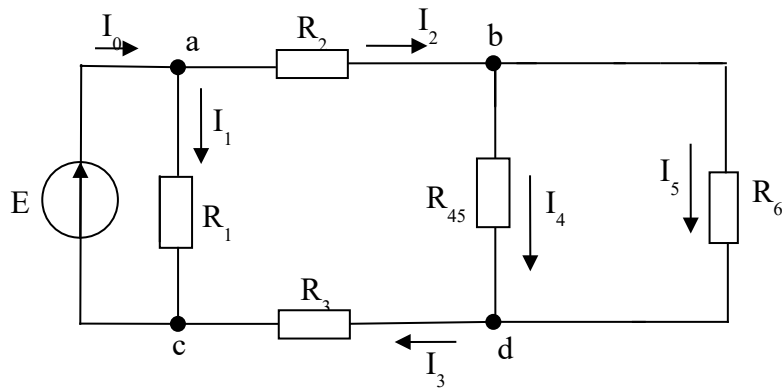


Рисунок 2.4

Резистори R_{45} та R_6 з'єднані паралельно, тому використовуємо формулу для паралельного з'єднання опорів (рисунок 2.5).

$$R_{456} = \frac{R_{45} \cdot R_6}{R_{45} + R_6} = \frac{24 \cdot 8}{24 + 8} = 6 \text{ Ом.}$$

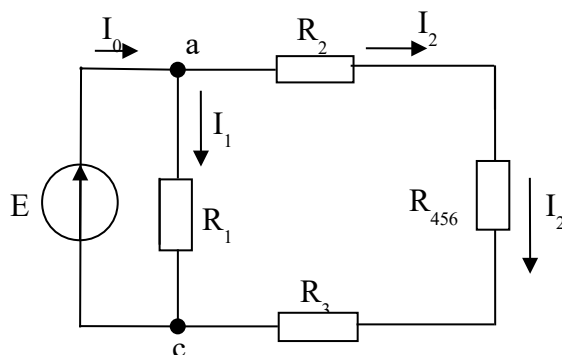


Рисунок 2.5

Резистори R_2 , R_3 та R_{456} з'єднані послідовно, отже, треба використати формулу для послідовного з'єднання опорів (рис. 2.6).

$$R_{23456} = R_2 + R_3 + R_{456} = 10 + 7 + 6 = 23 \text{ Ом.}$$

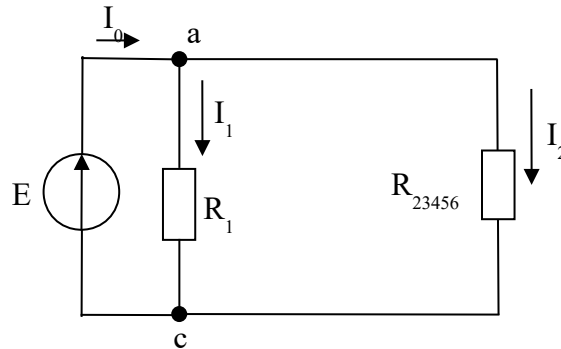


Рисунок 2.6

Резистори, що залишились, з'єднані паралельно, тому знайдемо еквівалентний опір схеми (рисунок 2.7).

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 \cdot R_{23456}}{R_1 + R_{23456}} = \frac{12 \cdot 23}{12 + 23} = 7,89 \text{ Ом.}$$

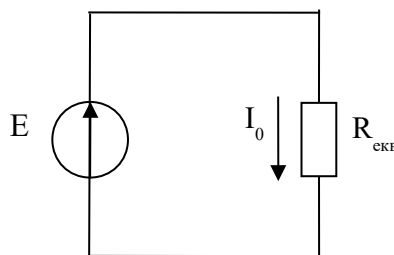


Рисунок 2.7

2 Визначаємо струм через джерело ЕРС за законом Ома

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{екв}}} = \frac{50}{7,89} = 6,34 \text{ А.}$$

3 Визначаємо невідомі струми за законами Ома та Кірхгофа.
 Напряга на опорі R_1 дорівнює E , тому знайдемо струм I_1 за законом Ома.

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{50}{12} = 4,17 \text{ А} .$$

Запишемо перший закон Кірхгофа для вузла «а» (рисунок 2.5) та знайдемо струм I_2 :

$$I_2 = I_0 - I_1 = 6,34 - 4,17 = 2,17 \text{ А} .$$

З виразу першого закону Кірхгофа для вузла «с» видно, що $I_3 = I_2$:

$$I_1 + I_3 - I_0 = 0 ;$$

$$I_3 = I_0 - I_1 = 6,34 - 4,17 = 2,17 \text{ А} .$$

Задамо обхід за годинниковою стрілкою, запишемо другий закон Кірхгофа для контуру «с-а-b-d-с» (рисунок 2.4) і знайдемо струм I_4

$$-I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_{45} = 0 ;$$

$$I_4 = \frac{I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3}{R_{45}} = \frac{4,17 \cdot 12 - 2,17 \cdot 10 - 2,17 \cdot 7}{24} = 0,55 \text{ А} .$$

Для вузла «b» запишемо перший закон Кірхгофа і знайдемо струм I_5 :

$$I_5 = I_2 - I_4 = 2,17 - 0,55 = 1,62 \text{ А} .$$

Другим варіантом знаходження струмів I_4 та I_5 є визначення напруги U_{bd} за законом Ома.

$$U_{bd} = I_2 \cdot R_{456} = 2,17 \cdot 6 = 13,2 \text{ В};$$

$$I_4 = \frac{U_{bd}}{R_{45}} = \frac{13,2}{24} = 0,55 \text{ А};$$

$$I_5 = I_2 - I_4 = 2,17 - 0,55 = 1,62 \text{ A.}$$

Ще одним варіантом знаходження струмів у гілках є використання формул розкиду. Наприклад, струм I_4 можна обчислити так:

$$I_4 = \frac{I_2 \cdot R_6}{R_{45} + R_6} = \frac{2,17 \cdot 8}{24 + 8} = 0,54 \text{ A.}$$

Похибка у 0,01 А виникає за рахунок округлення.

4 Падіння напруги на опорах розраховуються за законом Ома. Наприклад, падіння напруги на опорі R_4 дорівнює $U_4 = I_4 \cdot R_4 = 0,55 \cdot 15 = 8,25 \text{ В.}$

5 Перевіряємо розрахунок за другим законом Кірхгофа.

Наприклад, для зовнішнього контуру на рисунку 2.3.

$$E = I^2 \cdot (R^2 + R^3) + I^5 \cdot R^6 ;$$

$$2,17 \cdot (10 + 7) + 1,62 \cdot 8 = 49,85 \text{ В.}$$

Похибка у 0,05 В, що складає 0,1 %, виникає за рахунок округлення.

4 Контрольні запитання

1 Що таке ідеальне джерело ЕРС і як воно зображується на електричній схемі?

2 Що таке реальне джерело ЕРС і як воно зображується на електричній схемі?

3 Який напрямок струму приймається за позитивний?

4 Сформулювати закон Ома для частки кола з послідовним з'єднанням резисторів без джерел.

5 Сформулювати закон Ома для повного кола.

- 6 Сформулювати закон Ома для частки кола з послідовним з'єднанням резисторів та джерел.
- 7 Навести правила запису першого закону Кірхгофа.
- 8 Що таке незалежний контур?
- 9 Навести правила запису другого закону Кірхгофа.

Практичне заняття 3

Розрахунок електричного кола з одним джерелом струму

1 Вихідні дані та завдання

Для електричних кіл, зображених на рисунку 3.1, визначити струми в усіх гілках, напругу на затискачах джерела струму та перевірити розрахунок за законами Кірхгофа. Числові значення струму джерела та опорів резисторів наведені в таблиці 3.1.

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «джерело струму» та «різниця потенціалів».

Позначаємо та нумеруємо струми в усіх гілках залежно від напрямку джерела струму. Кількість невідомих струмів у колі дорівнює кількості гілок за мінусом кількості гілок з джерелами струму. За визначенням джерела струму струм у гілці, де знаходиться це джерело, дорівнює струму джерела струму і не залежить від опорів у цій гілці.

Щоб знайти струми в інших гілках, треба згортати схему, доки не залишаться тільки два вузли і три гілки, одна з яких з джерелом струму. Невідомі струми знаходять за формулами розкиду.

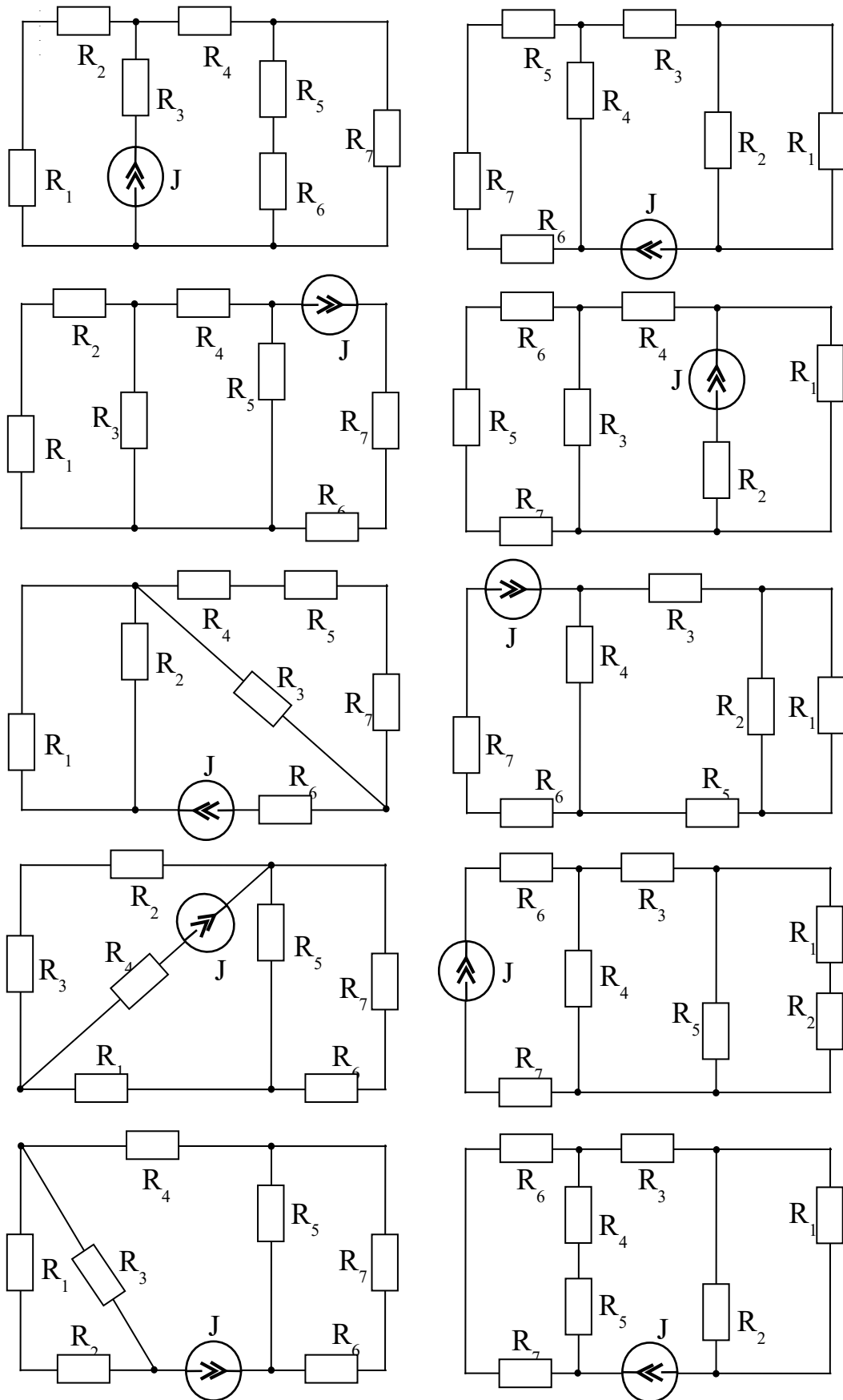


Рисунок 3.1

Таблиця 3.1

Варіант Т	Джерело струму, А	Опори, Ом					
	J	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
1	2	12	8	9	14	8	10
2	4	11	12	18	8	10	14
3	5	16	10	6	7	8	7
4	1	12	12	11	10	6	16
5	3	13	9	8	7	15	12
6	2	8	17	8	9	14	13
7	4	10	7	6	11	9	14
8	5	4	13	10	10	11	15
9	1	11	19	8	7	5	12
0	3	15	16	19	13	14	11

3 Приклад розрахунку

Нехай задана схема, що зображена на рисунку 3.2.

Вихідні дані: $J = 2$ А, $R_1 = 12$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 7$ Ом, $R_4 = 15$ Ом, $R_5 = 9$ Ом, $R_6 = 8$ Ом, $R_7 = 5$ Ом.

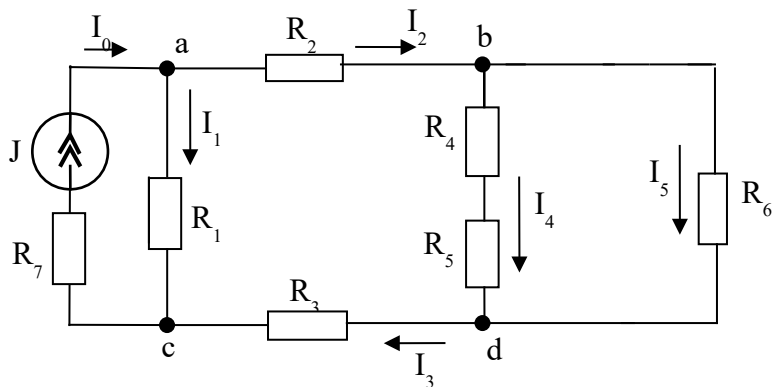


Рисунок 3.2

1 Задаємо дійсні напрямки струмів у всіх гілках за напрямком струму джерела і починаємо згортати схему шляхом еквівалентних перетворень.

Резистори R_4 та R_5 з'єднані послідовно, тому їх можна замінити еквівалентним, використовуючи формулу для послідовного з'єднання опорів (рисунок 3.3).

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 15 + 9 = 24 \text{ Ом.}$$

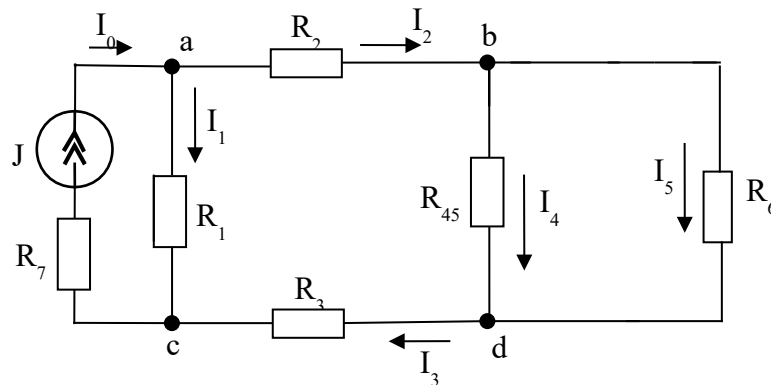


Рисунок 3.3

Резистори R_{45} та R_6 з'єднані паралельно, тому використовуємо формулу для паралельного з'єднання опорів (рисунок 3.4).

$$R_{456} = \frac{R_{45} \cdot R_6}{R_{45} + R_6} = \frac{24 \cdot 8}{24 + 8} = 6 \text{ Ом.}$$

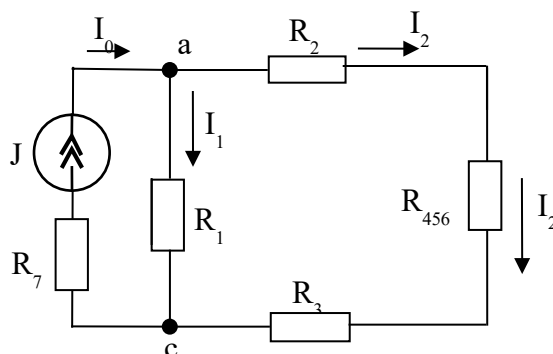


Рисунок 3.4

Резистори R_2 , R_3 та R_{456} з'єднані послідовно, отже, треба використати формулу для послідовного з'єднання опорів (рисунок 3.5).

$$R_{23456} = R_2 + R_3 + R_{456} = 10 + 7 + 6 = 23 \text{ Ом.}$$

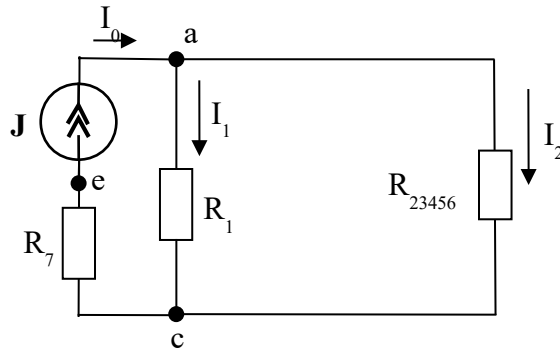


Рисунок 3.5

2 Оскільки $I_0 = J$, то знаходимо інші струми за формулами розкиду

$$I_1 = \frac{I_0 \cdot R_{23456}}{R_1 + R_{23456}} = \frac{2 \cdot 23}{12 + 23} = 1,31 \text{ А;}$$

$$I_2 = I_3 = \frac{I_0 \cdot R_1}{R_1 + R_{23456}} = \frac{2 \cdot 12}{12 + 23} = 0,69 \text{ А;}$$

$$I_4 = \frac{I_2 \cdot R_6}{R_{45} + R_6} = \frac{0,69 \cdot 8}{24 + 8} = 0,17 \text{ А;}$$

$$I_5 = \frac{I_2 \cdot R_{45}}{R_{45} + R_6} = \frac{0,69 \cdot 24}{24 + 8} = 0,52 \text{ А.}$$

3 Щоб знайти напругу на затискачах джерела струму, заземлюємо точку «e» (тобто приймаємо її потенціал таким, що дорівнює нулю) і знаходимо потенціал точки «a». Оскільки

струм I_0 тече від точки «с» до точки «е», то потенціал точки «с» більше за потенціал точки «е» на величину падіння напруги на резисторі R_7 , а потенціал точки «а» більше, ніж потенціал точки «с» на величину падіння напруги на резисторі R_1 .

$$\varphi_c = \varphi_e + I_0 \cdot R_7 = 0 + 2 \cdot 5 = 10 \text{ В};$$

$$\varphi_a = \varphi_c + I_1 \cdot R_1 = 10 + 1,31 \cdot 12 = 25,72 \text{ В.}$$

Наруга на затискачах джерела струму дорівнює різниці потенціалів між точками «а» та «е»:

$$U_{ae} = \varphi_a - \varphi_e = 25,72 \text{ В.}$$

4 Перевіряємо розрахунок за другим законом Кірхгофа для контуру «а-b-d-c-a» з напрямком обходу за годинниковою стрілкою

$$-I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_{45} = 0$$

4 Контрольні запитання

- 1 Що таке ідеальне джерело струму?
- 2 Що таке реальне джерело струму?
- 3 Як розрахувати струм у паралельних гілках за формулами розкиду?
- 4 Як змінюється потенціал при переході через резистор назустріч струму?
- 5 Як змінюється потенціал при переході через резистор за напрямком струму?
- 6 Як розраховується різниця потенціалів між точками електричного кола, якщо відомі усі струми?
- 7 Чому не можна записувати другий закон Кірхгофа для контуру з джерелом струму?

Практичне заняття 4

Розрахунок складного електричного кола методом накладання

1 Вихідні дані та завдання

Для складних електричних кіл, зображених на рисунку 4.1, визначити струми в усіх гілках, потужності, що розвивають джерела, потужності, що споживають опори. Перевірити розрахунок, склавши баланс потужностей. Числові значення параметрів кіл наведені в таблиці 4.1.

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти принцип суперпозиції та визначення понять «часткові струми», «потужність», «баланс потужностей».

Довільно направляємо та нумеруємо струми в гілках. Кількість невідомих струмів менше, ніж кількість гілок на кількість гілок з джерелами струму.

Згідно з принципом суперпозиції в лінійних електричних колах з декількома джерелами струму у кожній гілці дорівнює алгебраїчному доданку часткових струмів від кожного джерела окремо. Таким чином, схему треба розраховувати стільки разів, скільки в ній джерел не в одній гілці. Якщо декілька джерел послідовно включені в одну гілку, то їх можна замінити одним еквівалентним джерелом.

Складаємо першу розрахункову схему. Для цього залишаємо в схемі тільки якесь одне джерело (ЕРС або струму). Усі інші ідеальні джерела ЕРС закорочуємо, тобто замінюємо лініями, а у реальних джерел ЕРС залишаємо в схемі їх внутрішні опори. Гілки з іншими ідеальними джерелами струму розриваємо і фактично вилучаємо зі схеми, бо внутрішній опір ідеального джерела струму, який треба залишити у схемі, дорівнює безкінечності.

Таблиця 4.1

Варіант	Джерела		Опори, Ом						
	E, В	J, А	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
1	100	5	15	13	8	16	14	10	5
2	160	4	10	12	6	8	18	14	7
3	80	3	16	17	18	7	6	9	5
4	120	2	15	12	6	10	11	16	8
5	130	6	13	9	15	7	8	14	10
6	150	5	8	7	14	12	8	13	6
7	170	7	10	7	9	14	6	15	10
8	140	4	7	13	11	10	10	15	6
9	110	2	11	9	13	14	8	12	5
0	90	1	7	16	14	13	9	11	8

Розраховуємо схему з одним джерелом звичайним методом еквівалентних перетворень, позначивши у ній реальні напрямки струмів у гілках відповідно до напрямку джерела, і отримуємо комплект часткових струмів, тобто струмів у кожній гілці кола від дії цього джерела.

Аналогічно складаємо другу розрахункову схему і отримуємо другий комплект часткових струмів від дії другого джерела.

Реальні струми у кожній гілці знаходимо як алгебраїчний додаток часткових струмів у цій гілці. При цьому частковий струм записують зі знаком плюс, якщо його напрямок збігається з напрямком струму у гілці, обраним у первинній схемі, і зі знаком мінус, якщо не збігається.

Для складання балансу потужностей обчислюємо потужності, що розвивають джерела, та потужності, що споживають опори навантаження.

3 Приклад розрахунку

Нехай задано електричне коло, що зображено на рисунку 4.2.

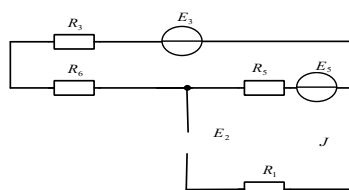


Рисунок 4.2

Спрощуємо схему, об'єднавши послідовно з'єднані опори R_3 та R_6 .

$$R_{36} = R_3 + R_6$$

Одержуємо кінцеву розрахункову схему (рисунок 4.3), виключивши дію джерела ЕРС E_2 , послідовно з'єданого з джерелом струму J .

Довільно вибираємо позитивні напрямки струмів у гілках. Для розрахунку часткових струмів від кожного з джерел треба розраховувати схему стільки разів, скільки є джерел (тобто три).

Складаємо першу розрахункову схему (рисунок 4.4), залишивши у ній тільки джерело E_3 , закоротивши джерело ЕРС E_5 та розімкнувши гілку з джерелом струму.

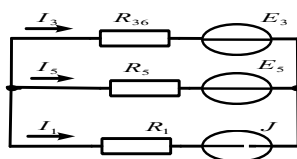


Рисунок 4.3

Позначаємо з індексами «штрих» реальні напрямки струмів від плюса джерела до мінуса.

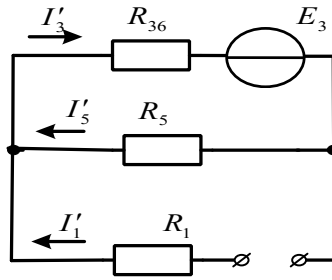


Рисунок 4.4

Розраховуючи схему за законом Ома, знаходимо часткові струми від дії джерела E_3

$$I'_1 = 0;$$

$$I'_3 = I'_5 = \frac{E_3}{R_{36} + R_5}.$$

Складаємо другу розрахункову схему (рисунок 4.5), залишивши у ній тільки джерело E_5 , закоротивши джерело ЕРС E_3 та розімкнувши гілку з джерелом струму. Позначаємо з індексами «два штрихи» реальні напрямки струмів від плюса джерела до мінуса.

Знаходимо часткові струми від дії E_5 :

$$I''_1 = 0;$$

$$I''_3 = I''_5 = \frac{E_5}{R_{36} + R_5}.$$

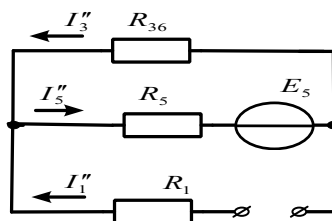


Рисунок 4.5

Складаємо третю розрахункову схему (рисунок 4.6), залишивши у ній тільки джерело струму та закоротивши джерела ЕРС. Позначаємо з індексами «три штрихи» реальні напрямки струмів за напрямком джерела струму.

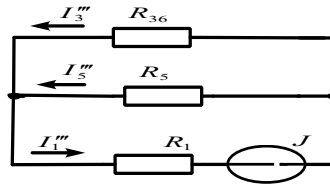


Рисунок 4.6

Знаходимо часткові струми від дії джерела струму за формулами розкиду, пам'ятаючи, що струм у гілці з джерелом струму не залежить від опорів цієї гілки і дорівнює струму джерела.

$$I_1''' = J;$$

$$I_3''' = J \cdot \frac{R_5}{R_{36} + R_5};$$

$$I_5''' = J \cdot \frac{R_{36}}{R_{36} + R_5}.$$

Визначаємо кожен з трьох дійсних струмів у колі за рисунком 4.3 як алгебраїчний додаток часткових струмів. Якщо напрямок часткового струму у гілці на розрахунковій схемі збігається з напрямком реального струму цієї гілки на рисунку 4.3, то цей частковий струм записують зі знаком плюс. Якщо не збігається – то мінус.

$$I_1 = -I_1' - I_1'' + I_1''';$$

$$I_3 = I_3' - I_3'' - I_3''';$$

$$I_5 = -I_5' + I_5'' - I_5'''.$$

Для перевірки проведених розрахунків використовується рівняння енергетичного балансу (балансу потужностей):

$$\sum_{k=1}^n I_k^2 R_k = \sum_{i=1}^m E_i I_i + U_{kn} J_k,$$

де n - число гілок з навантаженням;

m - число гілок із джерелами ЕРС.

Добуток $E_i I_i$ у правій частині рівняння береться зі знаком плюс, якщо напрямки ЕРС E_i і струму I_i збігаються. У протилежному випадку – зі знаком мінус. Якщо у схемі є джерело струму J_k , то потужність його буде дорівнювати $U_{kn} J_k$, де U_{kn} – напруга на затискачах джерела струму.

Перевіряємо правильність розрахунку вихідної схеми (рисунок 4.2), використовуючи рівняння енергетичного балансу

$$U_{kn} I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_4 + E_5 I_5 = I_1^2 R_1 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6,$$

де U_{kn} – напруга на затискачах джерела струму, яку знаходимо за правилом розподілу потенціалів у контурі.

$$U_{kn} = I_1 R_1 - E_2 - I_5 R_5 + E_5.$$

4 Контрольні запитання

- 1 У чому полягає принцип суперпозиції?
- 2 Скільки розрахункових схем потрібно скласти при використанні методу накладання?
- 3 Що треба зробити з ідеальними джерелами ЕРС при складанні розрахункових схем?
- 4 Що треба зробити з ідеальними джерелами струму при складанні розрахункових схем?
- 5 Чому при складанні розрахункових схем треба залишати у схемі внутрішні опори джерел?

- 6 Що таке часткові струми?
- 7 Яким чином знаходять реальні струми у гілках після розрахунку усіх часткових струмів?
- 8 Чи може у результаті розрахунку бути отримано від'ємне значення струму у гілці?
- 9 Навести правила складання балансу потужностей.
- 10 Що означає від'ємна потужність джерела у балансі потужностей?
- 11 Чому у правій частині рівняння балансу потужностей не може бути від'ємних значень потужностей, що споживають опори?
- 12 Як знайти напругу на затискачах джерела струму?

Практичне заняття 5

Розрахунок електричного кола методом контурних струмів

1 Вихідні дані та завдання

Для складного електричного кола, зображеного на рисунку 5.1, визначити струми в усіх гілках методом контурних струмів. Перевірити розрахунок за першим законом Кірхгофа.

Числові значення параметрів кола наведені в таблиці 5.1. Викладач має змогу замінити розрахункову схему для кожного студента на схему за його варіантом розрахунково-графічної роботи.

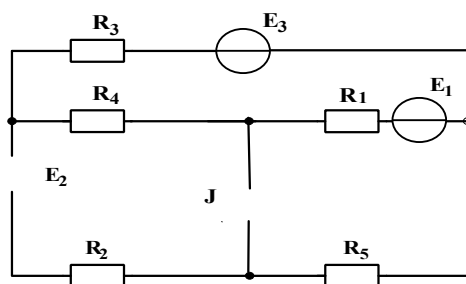


Рисунок 5.1

Таблиця 5.1

Варіант	Джерела				Опори, Ом				
	J, А	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
1	5	100	20	10	15	13	0	16	4
2	4	160	40	20	0	12	6	8	6
3	3	80	60	30	16	0	18	7	5
4	2	120	80	40	15	12	0	10	9
5	6	130	30	50	13	0	15	7	8
6	5	150	50	10	0	7	14	12	10
7	7	170	70	20	10	0	9	14	12
8	4	140	90	30	0	13	11	10	6
9	2	110	10	40	11	0	13	14	7
0	1	90	40	60	7	16	0	13	8

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «контурний струм», «контурна ЕРС», «власний опір контуру», «суміжний опір контурів».

Довільно позначаємо напрямки струмів у всіх гілках. Визначаємо у розрахунковому колі незалежні контури, кількість яких дорівнює

$$K = \Gamma - (B - 1),$$

де K – необхідна кількість незалежних контурів;

Γ – кількість гілок у схемі електричного кола;

B – кількість вузлів у схемі електричного кола.

Якщо у колі є джерела струму, то треба обирати контури таким чином, щоб гілки з джерелами струму не були загальними для будь – якої пари обраних контурів.

В обраних контурах довільно позначаємо напрямки контурних струмів.

Складаємо формалізовану систему рівнянь відносно контурних струмів. Формалізованою є система, кількість рівнянь якої дорівнює необхідній кількості незалежних контурів (K).

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} + R_{13} \cdot I_{33} = E_{11} \\ R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} + R_{23} \cdot I_{33} = E_{22} \\ R_{31} \cdot I_{11} + R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} = E_{33} \end{cases},$$

де E_{11}, E_{22}, E_{33} - контурні ЕРС;

R_{11}, R_{22}, R_{33} - власні опори контурів;

$R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, R_{31}, R_{32}$ - загальні (суміжні) опори пар контурів;

$$R_{12} = R_{21}; R_{13} = R_{31}; R_{32} = R_{23}.$$

У кінцевій системі рівнянь при використанні методу контурних струмів кількість рівнянь буде менше за кількість обраних незалежних контурів (K) на кількість джерел струму у колі.

Отримуємо кінцеву систему рівнянь шляхом вилучення із формалізованої системи тих рівнянь, що відповідають запису другого закону Кірхгофа для контурів з джерелами струму. Наприклад, якщо джерело струму у другому контурі, то залишається система двох рівнянь з двома невідомими

контурними струмами I_{11} та I_{33} . Контурний струм другого контуру дорівнює у цьому випадку струму джерела струму з відповідним знаком плюс або мінус залежно від збігу їхніх напрямків.

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} + R_{13} \cdot I_{33} = E_{11} \\ R_{31} \cdot I_{11} + R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} = E_{33} \end{cases}$$

Обчислюємо контурні ЕРС як алгебраїчну суму ЕРС, що входять у даний контур. Якщо напрямок ЕРС збігається з напрямком контурного струму, то вона береться зі знаком плюс, якщо не збігається – то зі знаком мінус.

Знаходимо власні опори контурів як арифметичні суми всіх опорів, що входять у контур.

Визначаємо загальні (суміжні) опори пар контурів. Загальний опір двох контурів дорівнює арифметичній сумі опорів гілок, що входять в обидва контури і береться зі знаком плюс, якщо контурні струми, що протікають через ці гілки, збігаються по напрямку. Коли напрямки контурних струмів у суміжних гілках не збігаються, загальний опір записують зі знаком мінус. Доцільно задавати напрямки контурних струмів в один бік (наприклад, за годинниковою стрілкою), тоді усі суміжні опори мають від’ємне значення і не потребують будь – якого аналізу.

Розв’язуємо отриману систему рівнянь яким завгодно математичним методом з урахуванням того, що для контурів з джерелами струму значення контурних струмів нам відомі і дорівнюють заданим струмам відповідних джерел струму.

Визначаємо струми у кожній гілці кола як алгебраїчну суму контурних струмів, що протікають через цю гілку. Контурний струм береться зі знаком плюс, якщо його напрямок збігається з обраним напрямком дійсного струму, в іншому випадку – зі знаком мінус.

Результати обчислень перевіряють за другим законом Кірхгофа.

3 Приклад розрахунку

У вихідній схемі на рисунку 5.2 визначаємо три незалежні контури і довільно позначаємо напрямки струмів у гілках та контурних струмів.

Обчислюємо контурні ЕРС та власні опори для контурів, що не містять джерел струму (тобто для першого та другого):

$$E_{11} = E_3 - E_5 ;$$

$$E_{22} = E_2 + E_4 .$$

$$R_{11} = R_3 + R_5 + R_6 ;$$

$$R_{22} = R_4 + R_6 .$$

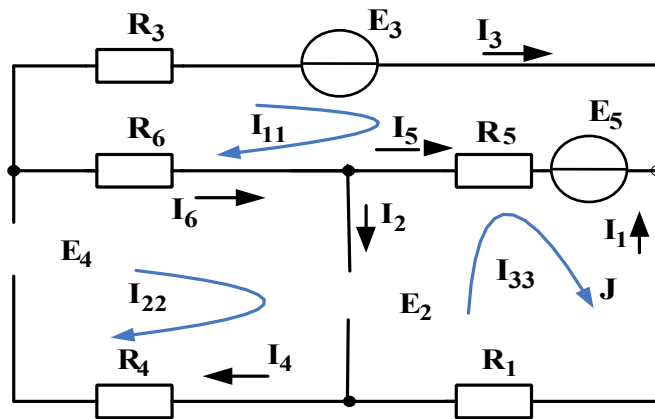


Рисунок 5.2

Визначаємо суміжні (загальні) опори контурів:

$$R_{12} = R_{21} = -R_6 ;$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_5 ;$$

$$R_{23} = R_{32} = 0 .$$

Складаємо кінцеву систему рівнянь за методичними вказівками попереднього пункту.

$$E_{11} = I_{11} R_{11} + I_{22} R_{12} + I_{33} R_{13} ;$$

$$E_{22} = I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22} + I_{33} R_{23} .$$

Оскільки третій контур містить джерело струму, то його контурний струм дорівнює струму джерела струму.

$$I_{33} = -J .$$

Розв'язуючи кінцеву систему рівнянь яким завгодно методом (наприклад, методом визначників або підстановки), знаходимо контурні струми I_{11} і I_{22} .

Дійсні струми у гілках знаходимо як алгебраїчні додатки контурних струмів, що замикаються через дану гілку з урахуванням їхніх напрямків.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{33} ; & I_2 &= I_{22} - I_{33} ; & I_3 &= I_{11} ; \\ I_4 &= I_{22} ; & I_5 &= I_{33} - I_{11} ; & I_6 &= I_{22} - I_{11} . \end{aligned}$$

Перевіряємо розрахунок за допомогою рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} I_4 &= I_3 + I_6 ; \\ I_1 + I_3 + I_5 &= 0 ; \\ I_6 &= I_2 + I_5 . \end{aligned}$$

4 Контрольні запитання

- 1 Скільки незалежних контурів треба визначити у колі при використанні методу контурних струмів?
- 2 Як треба обирати контури, якщо у колі є джерела струму?
- 3 Чи реально існують у колі контурні струми?
- 4 Що таке контурні ЕРС і як їх розрахувати?
- 5 Що таке власні контурні опори і як їх розрахувати?
- 6 Що таке суміжні опори і як їх розрахувати?
- 7 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі без джерел струму?
- 8 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі з джерелами струму?
- 9 Чому при наявності у колі джерел струму кількість необхідних рівнянь зменшується?

10 Які рівняння треба вилучити з формалізованої системи при наявності у колі джерел струму?

11 Які є математичні методи розв'язання системи рівнянь з невідомими контурними струмами?

12 Як знайти реальні струми у гілках після розв'язання системи і знаходження контурних струмів?

13 Як зробити перевірку розрахунку кола за методом контурних струмів?

Практичне заняття 6

Розрахунок електричного кола методом вузлових потенціалів

1 Вихідні дані та завдання

Розрахувати коло з попереднього практичного заняття (рисунок 5.1) методом вузлових потенціалів. Перевірити розрахунок за другим законом Кірхгофа. Викладач має змогу замінити розрахункову схему для кожного студента на схему за його варіантом розрахунково-графічної роботи.

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «вузловий струм», «власна провідність вузла», «суміжні провідності вузлів».

Довільно позначаємо напрямки струмів у всіх гілках електричного кола.

Заземлюємо один з тих вузлів, між якими розташовується гілка, що містить тільки ідеальне джерело ЕРС без опору. У цьому випадку до початку розрахунку буде відомо потенціал другого з цих вузлів. Він дорівнює позитивній величині ЕРС, якщо її напрямок іде від заземленого вузла, і від'ємному значенню величини ЕРС при її напрямку до заземленого вузла.

Позначаємо номери незаземлених вузлів та складаємо формалізовану систему рівнянь відносно незаземлених вузлових потенціалів. Формалізованою є система, кількість рівнянь якої дорівнює кількості незаземлених вузлів.

$$\begin{cases} G_{11} \cdot \varphi_1 + G_{12} \cdot \varphi_2 + G_{13} \cdot \varphi_3 = J_{11} \\ G_{21} \cdot \varphi_1 + G_{22} \cdot \varphi_2 + G_{23} \cdot \varphi_3 = J_{22} \\ G_{31} \cdot \varphi_1 + G_{32} \cdot \varphi_2 + G_{33} \cdot \varphi_3 = J_{33} \end{cases} ,$$

де J_{11}, J_{22}, J_{33} - вузлові струми незаземлених вузлів;

G_{11}, G_{22}, G_{33} - власні провідності незаземлених вузлів;

$G_{12}, G_{13}, G_{21}, G_{23}, G_{31}, G_{32}$ – суміжні (загальні) провідності незаземлених вузлів, узяті зі знаком мінус.

$$G_{12} = G_{21}; \quad G_{13} = G_{31}; \quad G_{32} = G_{23} .$$

Оскільки потенціал вузла, з'єднаного з заземленим вузлом через гілку з ідеальним джерелом без опору, вже знайдено, то вилучаємо з формалізованої системи те рівняння, у правій частині якого міститься вузловий струм вузла з відомим потенціалом. Наприклад, якщо потенціал φ_2 вузла 2 вже знайдено, то залишається система двох рівнянь з двома невідомими потенціалами φ_1 та φ_3 :

$$\begin{cases} G_{11} \cdot \varphi_1 + G_{13} \cdot \varphi_3 = J_{11} \\ G_{31} \cdot \varphi_1 + G_{33} \cdot \varphi_3 = J_{33} \end{cases} .$$

Визначаємо вузлові струми, що залишилися у кінцевій системі рівнянь. У формуванні вузлового струму J_{kk} вузла з порядковим номером k беруть участь ті гілки, що підходять до цього вузла та містять джерела електричної енергії. Якщо гілка з номером p містить джерело ЕРС E_p , спрямоване до вузла k , то її внесок у формування вузлового струму J_{kk} дорівнює $(+E_p \cdot G_p)$, а якщо ця ЕРС спрямована від вузла k , то внесок складає $(-E_p \cdot G_p)$, де G_p - провідність гілки p . Якщо гілка p містить джерело струму J_p , то її внесок у формування вузлового струму J_{kk} дорівнює

струму \mathbf{J}_p , який має бути введений у \mathbf{J}_{kk} зі знаком плюс, якщо \mathbf{J}_p спрямован до вузла k , і зі знаком мінус, якщо від вузла k .

Обчислюємо власні провідності незаземлених вузлів, що залишилися у кінцевій системі рівнянь. Власна провідність вузла – це арифметична сума провідностей усіх гілок, з'єднаних з даним вузлом.

Визначаємо суміжні (загальні) провідності незаземлених вузлів. Суміжною провідністю двох вузлів є сума провідностей гілок, що безпосередньо з'єднують ці вузли. **Суміжні провідності завжди беруться зі знаком мінус.**

Розв'язуючи отриману систему, знаходимо вузлові потенціали.

Обчислюємо струми у гілках за законом Ома

$$\mathbf{I}_{km} = \frac{\varphi_k - \varphi_m \pm \mathbf{E}_{km}}{\mathbf{R}_{km}},$$

де \mathbf{E}_{km} береться зі знаком плюс, якщо у гілці km струм \mathbf{I}_{km} та ЕРС \mathbf{E}_{km} збігаються за напрямком.

Результати обчислень перевіряємо за другим законом Кірхгофа та порівнюємо з розрахунками цієї схеми методом контурних струмів.

3 Приклад розрахунку

Довільно позначаємо напрямки струмів у гілках розрахункового кола з попереднього практичного заняття (рисунок 6.1). Для більш наглядного порівняння доцільно використати такі ж самі напрямки струмів, що були обрані при розрахунку методом контурних струмів.

Заземлюємо вузол 0, до якого підходить гілка, що містить тільки ідеальне джерело ЕРС, та нумеруємо незаземлені вузли. Потенціал вузла 1 дорівнює від'ємному значенню ЕРС \mathbf{E}_2 , бо при переході від вузла 0 до вузла 1 переміщення відбувається назустріч ЕРС.

$$\varphi_1 = -\mathbf{E}_2 .$$

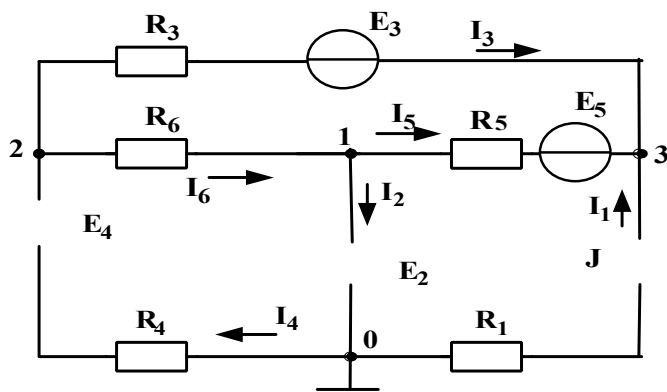


Рисунок 6.1

Визначаємо вузлові струми вузлів, потенціали яких ще не відомі (тобто вузлів 2 і 3).

$$J_{22} = \frac{E_4}{R_4} - \frac{E_3}{R_3};$$

$$J_{33} = J + \frac{E_3}{R_3} + \frac{E_5}{R_5}.$$

Обчислюємо власні провідності вузлів 2 і 3.

$$G_{22} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = G_3 + G_4 + G_6;$$

$$G_{33} = \frac{1}{R_1 + \infty} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} = G_1 + G_3 + G_5.$$

Визначаємо суміжні провідності незаземлених вузлів

$$G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_6} = -G_6;$$

$$G_{13} = G_{31} = -\frac{1}{R_5} = -G_5;$$

$$G_{23} = G_{32} = -\frac{1}{R_3} = -G_3.$$

Складаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{22} = \varphi_1 \mathbf{G}_{12} + \varphi_2 \mathbf{G}_{22} + \varphi_3 \mathbf{G}_{23} \\ \mathbf{J}_{33} = \varphi_1 \mathbf{G}_{13} + \varphi_2 \mathbf{G}_{32} + \varphi_3 \mathbf{G}_{33} \end{cases}$$

Розв'язуючи отриману систему, обчислюємо потенціали вузлів 2 і 3.

Визначаємо струми у гілках, використовуючи закон Ома для ділянки кола, що містить джерело ЕРС, та перший закон Кірхгофа.

У гілці 1 знаходиться джерело струму \mathbf{J} , тому $\mathbf{I}_1 = \mathbf{J}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_3 &= \frac{\varphi_2 - \varphi_3 + \mathbf{E}_3}{\mathbf{R}_3}; & \mathbf{I}_4 &= \frac{\varphi_0 - \varphi_2 + \mathbf{E}_4}{\mathbf{R}_4}; & \mathbf{I}_5 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + \mathbf{E}_5}{\mathbf{R}_5}; \\ \mathbf{I}_3 &= \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\mathbf{R}_6}; & \mathbf{I}_2 &= \mathbf{I}_6 - \mathbf{I}_5. \end{aligned}$$

Перевіряємо розрахунок за допомогою рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_4 &= \mathbf{I}_4 \mathbf{R}_4 + \mathbf{I}_6 \mathbf{R}_6; \\ \mathbf{E}_3 - \mathbf{E}_5 &= \mathbf{I}_3 \mathbf{R}_3 - \mathbf{I}_5 \mathbf{R}_5 - \mathbf{I}_6 \mathbf{R}_6. \end{aligned}$$

4 Контрольні запитання

1 Коли доцільно використовувати метод вузлових потенціалів у порівнянні з методом контурних струмів?

2 Чому доцільно заземлювати вузол, до якого підходить гілка з ідеальним джерелом ЕРС?

3 Що таке вузловий струм і як його обчислити?

4 Назвати одиницю виміру провідності

5 Чому дорівнює провідність гілки з джерелом струму?

6 Що таке власна провідність вузла і як її обчислити?

7 Що таке суміжна провідність вузлів і як її обчислити?

8 Як знайти струми у гілках після знаходження вузлових потенціалів?

Практичне заняття 7

Розрахунок електричного кола методом еквівалентного генератора

1 Вихідні дані та завдання

В електричному колі з рисунка 7.1 знайти струм через один опір, номер якого вказано в останньому стовпці таблиці 7.1 методом еквівалентного генератора.

Якщо у таблиці параметрів ЕРС дорівнює нулю, то її треба зі схеми вилучити (замінити прямою лінією) без зміни нумерації інших ЕРС.

Викладач має змогу замінити розрахункову схему для кожного студента на схему за його варіантом розрахунково-графічної роботи.

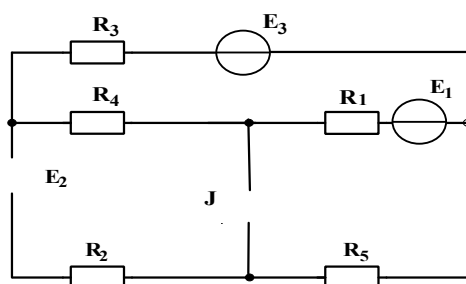


Рисунок 7.1.

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «еквівалентний генератор», «вхідний опір», «холостий хід» та вивчити теорему про еквівалентний генератор.

Визначаємо напругу U_{abxx} на затискачах розімкненої гілки, опір якої вказано в останньому стовпці таблиці 7.1. Для цього краще за все використати кінцеву систему рівнянь з методу вузлових потенціалів, отриману на попередньому практичному занятті, з урахуванням того, що провідність розімкненої гілки дорівнює нулю, або розрахувати коло з розімкненою гілкою методом контурних струмів.

Методом еквівалентних перетворень обчислюємо вхідний опір $R_{вх}$ усієї схеми по відношенню до затискачів ab розімкненої гілки при закорочених джерелах ЕРС і вилучених гілках з джерелами струму.

Визначаємо шуканий струм за формулою закону Ома:

$$I_n = \frac{U_{abxx} \pm E_n}{R_n + R_{вх}},$$

де R_n - опір гілки, у якій визначається струм;

E_n - джерело ЕРС цієї гілки.

Якщо E_n і I_n збігаються за напрямком, то E_n береться зі знаком плюс. В іншому випадку – мінус.

Таблиця 7.1

Варіант	Джерела				Опори, Ом					Номер опору для визначення струму
	J, А	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	
1	5	100	20	0	15	13	8	16	4	R ₄
2	4	160	40	20	10	12	6	8	6	R ₃
3	3	80	0	30	16	9	18	7	5	R ₅
4	2	120	80	40	15	12	6	10	9	R ₁
5	6	130	30	50	13	6	15	7	8	R ₄
6	5	150	50	10	8	7	14	12	10	R ₂
7	7	170	70	20	10	8	9	14	12	R ₅
8	4	140	0	30	5	13	11	10	6	R ₃

9	2	110	10	40	11	6	13	14	7	R_2
0	1	90	0	60	7	16	9	13	8	R_1

3 Приклад розрахунку

Нехай за завданням треба обчислити методом еквівалентного генератора струм у гілці з опором R_4 кола за рисунком 7.2.

Для визначення напруги на затискачах розімкненої гілки обираємо два незалежні контури і використовуємо метод контурних струмів. Оскільки у контурі 1 знаходиться джерело струму, то $I_{11} = J$. Обчислюємо контурну ЕРС першого контуру, а також власні та суміжні опори.

$$E_{22} = E_3 - E_5;$$

$$R_{22} = R_3 + R_5 + R_6;$$

$$R_{12} = R_{21} = R_5.$$

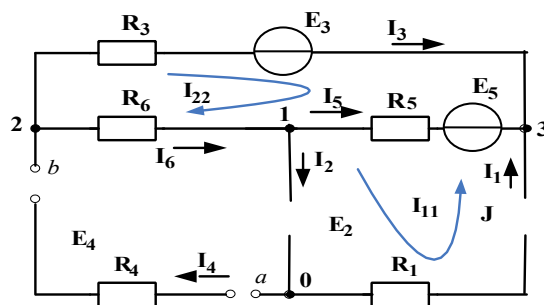


Рисунок 7.2

Знаходимо струм I_{22} , розв'язуючи рівняння

$$E_{22} = I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22}.$$

Знаходимо струм $I_6 = -I_{22}$.

Знаходимо напругу холостого ходу між точками a та b як різницю потенціалів

$$U_{abxx} = \varphi_a - \varphi_b = -I_3 R_6 + E_2 .$$

Для обчислення вхідного опору схеми відносно затискачів *ab* замінюємо ідеальні джерела ЕРС на перемички, а джерело струму – на розрив гілки (рисунок 7.3).

Опори R_3 та R_5 з'єднані послідовно, а опір R_6 до них – паралельно.

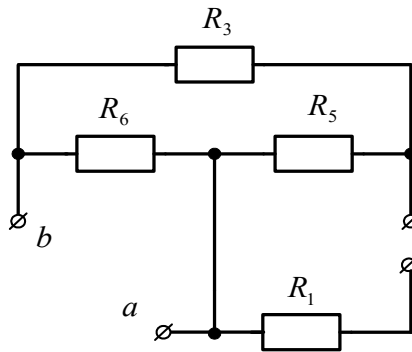


Рисунок 7.3

$$R_{вх} = \frac{(R_3 + R_5)R_6}{R_3 + R_5 + R_6} .$$

Визначаємо шуканий струм I_4 за формулою теореми про еквівалентний генератор:

$$I_4 = \frac{U_{abxx} \pm E_4}{R_{вх} + R_4} .$$

Оскільки напрямок ЕРС E_4 збігається з напрямком струму у цій гілці, то у чисельнику формули ЕРС E_4 треба брати зі знаком плюс.

4 Контрольні запитання

- 1 Коли доцільно використовувати метод еквівалентного генератора?
- 2 Сформулювати теорему про еквівалентний генератор.

3 Що таке холостий хід, і як знайти напругу у режимі холостого ходу між точками підключення гілки, у якій треба знайти струм методом еквівалентного генератора?

4 Чому дорівнює і як обчислити внутрішній опір еквівалентного генератора?

5 Що треба зробити з джерелами ЕРС та струму для обчислення вхідного опору схеми по відношенню до точок підключення розрахункової гілки?

6 Як знайти струм у розрахунковій гілці після знаходження ЕРС та внутрішнього опору еквівалентного генератора?

Практичне заняття № 8

Розрахунок електричного кола з нелінійними елементами

1 Вихідні дані та завдання

Для електричних кіл з мішаним з'єднанням лінійних та нелінійних опорів, що наведені зі своїми вольт-амперними характеристиками на рисунках 8.1 та 8.2, розрахувати струми в усіх гілках та напруги на елементах за заданим значенням одного з цих параметрів.

2 Методичні рекомендації щодо виконання завдання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «нелінійний опір», «вольт-амперна характеристика», «статичний та диференціальний опір нелінійних елементів».

Три струми і три напруги у схемі мішаного з'єднання трьох лінійних та нелінійних опорів можуть бути розраховані за заданим одним параметром графоаналітичним методом, якщо відомі їх вольт-амперні характеристики.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) нелінійного чи лінійного опору дозволяє знайти струм через цей елемент, якщо на ньому відома напруга, або напругу, якщо відомий струм, бо за наявністю у схемі нелінійного елемента опори не можна еквівалентно перетворювати за відомими раніше формулами послідовного та паралельного з'єднання для лінійних кіл.

Багато схем можуть бути легко розраховані за законами Кірхгофа без побудови результуючої ВАХ, тому спочатку треба ретельно перевірити таку можливість.

Щоб замінити два нелінійних опори, з'єднаних паралельно, одним еквівалентним, треба побудувати їх результуючу ВАХ шляхом додавання ординат (струмів) при незмінних абсцисах (напругах).

Щоб замінити два нелінійних опори, з'єднаних послідовно, одним еквівалентним, треба побудувати їх результуючу ВАХ шляхом додавання абсцис (напруг) при незмінних ординатах (струмах).

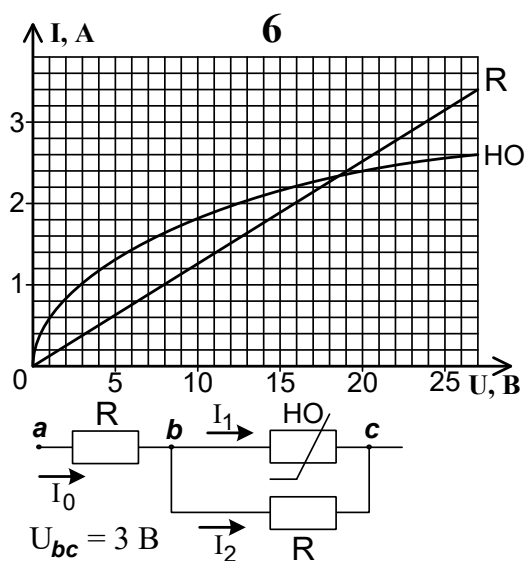
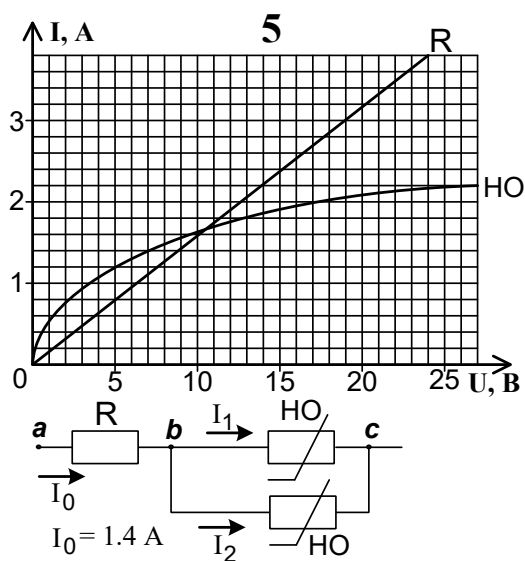
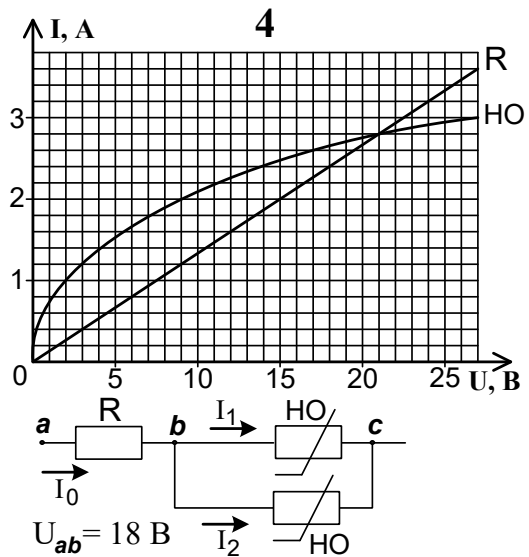
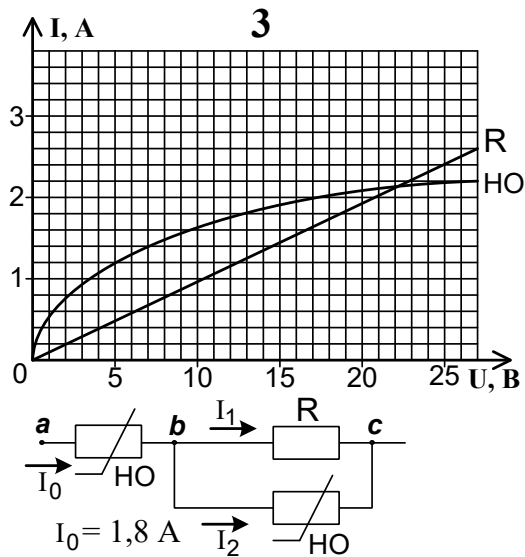
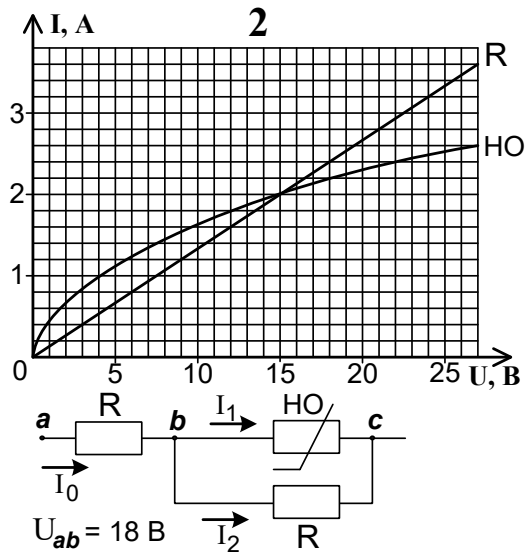
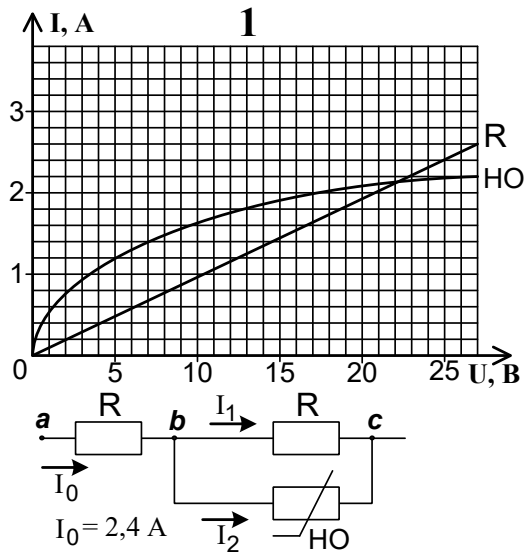


Рисунок 8.1

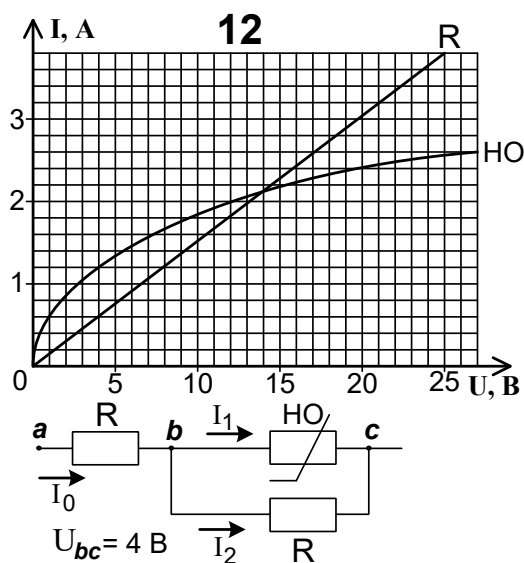
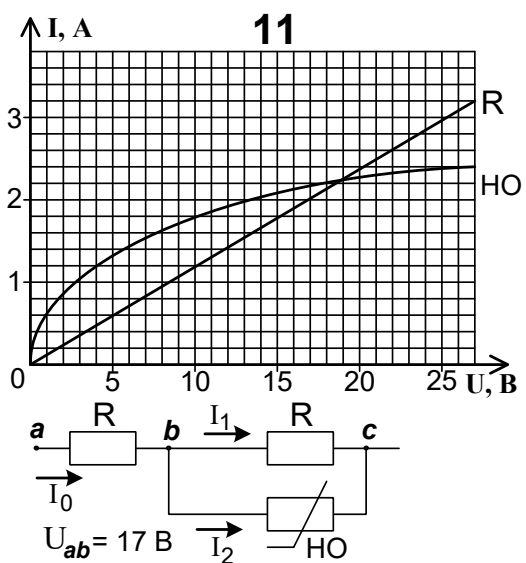
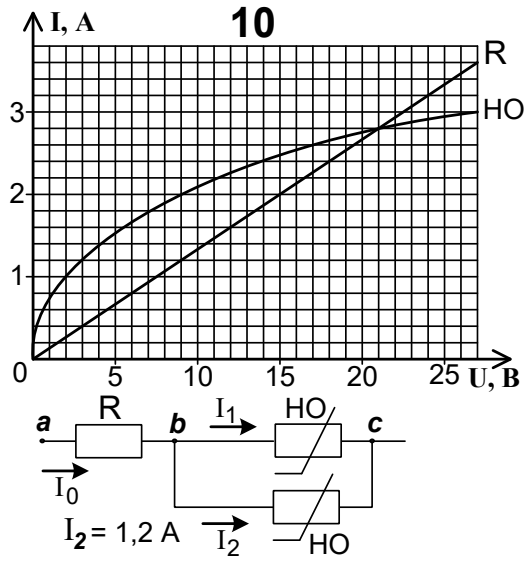
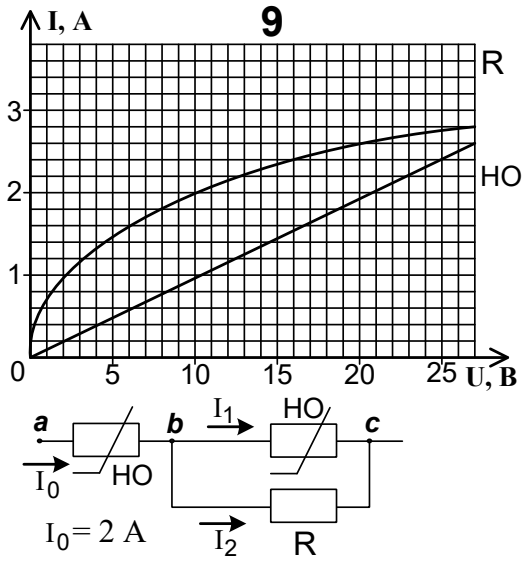
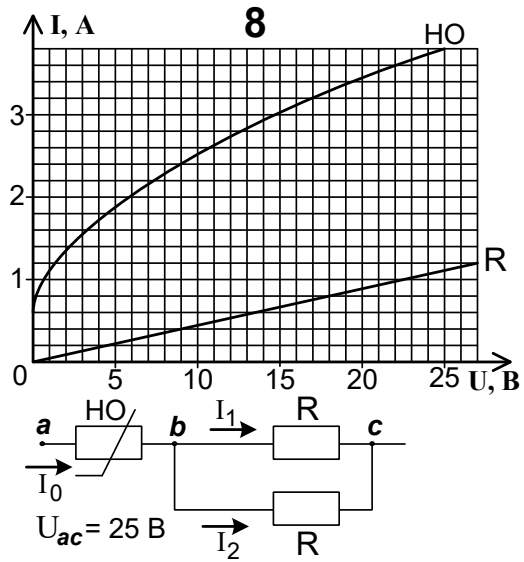
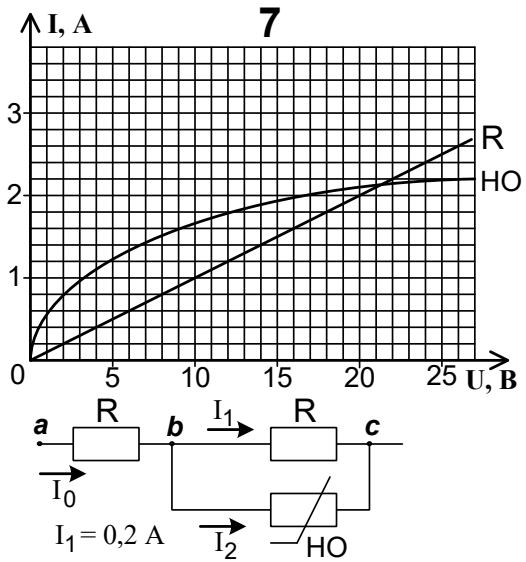


Рисунок 8.2

3 Приклад розрахунку

Нехай задано схему та ВАХ елементів, що наведені на рисунку 8.3.

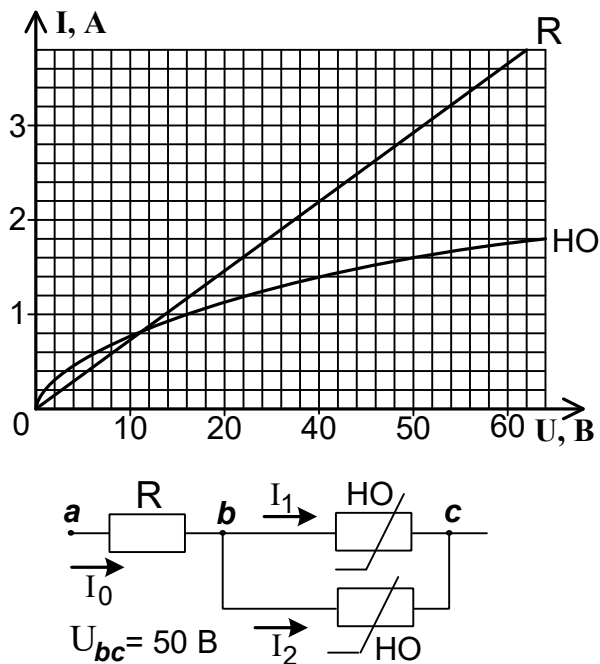


Рисунок 8.3

За допомогою ВАХ нелінійного опору (**НО**) знаходимо струми через нелінійні опори за даним значенням $U_{bc} = 50 \text{ В}$.

Для цього від точки 50 В на осі абсцис піднімаємо перпендикуляр до ВАХ **НО** і на осі ординат читаємо значення струму.

$$I_1 = I_2 = 1,6 \text{ А .}$$

Струми I_1 та I_2 дорівнюють один одному, оскільки обидва **НО** мають однакову ВАХ.

Струм I_0 через опір **R** у нерозгалуженій частині кола **ab** знаходимо за першим законом Кірхгофа.

$$I_0 = I_1 + I_2 = 1,6 + 1,6 = 3,2 \text{ А}$$

Напругу між точками **ab** знаходимо за ВАХ лінійного опору **R** для струму 3,2 А. Для цього з точки 3,2 А на осі ординат

проводимо лінію, паралельну осі абсцис до перетину з ВАХ R та опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис.

$$U_{ab} = 54 \text{ В} .$$

Напруга між точками **ac** за другим законом Кірхгофа дорівнює доданку:

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = 54 + 50 = 104 \text{ В} .$$

4 Контрольні запитання

- 1 Що таке нелінійний опір?
- 2 Що таке вольт-амперна характеристика?
- 3 Чому не можна використовувати звичайні формули послідовного та паралельного з'єднання опорів при наявності нелінійного елемента?
- 4 Як побудувати результуючу ВАХ при послідовному з'єднанні нелінійних опорів?
- 5 Як побудувати результуючу ВАХ при паралельному з'єднанні нелінійних опорів?
- 6 Як за наявності ВАХ нелінійного елемента знаходити струми та напруги?
- 7 Чи завжди треба будувати результуючу ВАХ для розрахунку схеми мішаного з'єднання нелінійних елементів?

Практичне заняття 9

Контрольне модульне тестування

1 Загальні положення

Контрольне модульне тестування є логічним кінцевим етапом і перевіркою якості засвоєння теоретичного матеріалу та набуття первісних практичних навиків розрахунку електричних кіл постійного струму у першій половині семестру.

Завдання контрольного тестування складається з теоретичних питань та задач для практичного розв'язання, аналогічних до тих, що розглядалися на практичних заняттях. Тестові питання, що подані нижче, є узагальненими, тобто одне питання може бути розділено на декілька частин або сформульоване інакше.

Викладач, що проводить тестування, повинен забезпечити контроль за самостійністю роботи кожного студента.

2 Тестові питання

- 1 Які заряди є вільними?
- 2 Які заряди є зв'язаними?
- 3 Що таке «заряд-крапка»?
- 4 Що таке «пробний заряд»?
- 5 Закон Кулона.
- 6 Що таке електростатичне поле та його напруженість?
- 7 Що таке силові лінії електростатичного поля?
- 8 Визначення еквіпотенціалей.
- 9 Що розуміють під картиною електростатичного поля?
- 10 Що таке потенціал і різниця потенціалів?
- 11 Що таке напруга і падіння напруги?
- 12 Що таке градієнт потенціалу?
- 13 Що таке потенціальна діаграма і правила її побудови.
- 14 Що таке постійний електричний струм?
- 15 Що таке електричне коло?
- 16 Що таке електрична схема?
- 17 Визначення понять «вузол», «гілка», «контур».
- 18 Яке з'єднання елементів кола є послідовним?
- 19 Яке з'єднання елементів кола є паралельним?
- 20 Визначення понять ідеальних і реальних джерел ЕРС та струму.
- 21 Перетворення реального джерела ЕРС у реальне джерело струму.
- 22 Формулювання, фізичний сенс та правила запису першого закону Кірхгофа.
- 23 Формулювання, фізичний сенс та правила запису другого закону Кірхгофа.

- 24 Закон Джоуля - Ленца.
- 25 Закон Ома у трьох формах.
- 26 Рівняння балансу потужностей.
- 27 Визначення простого та складного електричного кола.
- 28 Послідовність розрахунку простих електричних кіл.
- 29 Правило розкиду.
- 30 Формули визначення еквівалентного опору при послідовному, паралельному та мішаному з'єднанні опорів.
- 31 Формули перетворення зірки опорів у трикутник.
- 32 Формули перетворення трикутника опорів у зірку.
- 33 Принцип суперпозиції.
- 34 Що лежить в основі методу накладання, і коли доцільно його застосування?
- 35 Коли доцільно застосування методу рівнянь Кірхгофа?
- 36 Що лежить в основі методу контурних струмів, і коли доцільно його застосування?
- 37 Який закон електротехніки лежить в основі методу вузлових потенціалів, і коли доцільно його застосування?
- 38 Теорема про еквівалентний генератор (джерело ЕРС та джерело струму).
- 39 Що лежить в основі методу еквівалентного генератора, і коли доцільно його застосування?
- 40 Що таке контурна ЕРС?
- 41 Що таке власний опір контуру?
- 42 Що таке загальний або суміжний опір контурів?
- 43 Як знайти реальний струм у гілці за методом контурних струмів?
- 44 Як знайти вузловий струм у методі вузлових потенціалів?
- 45 Що таке власна провідність вузла?
- 46 Що таке загальна або суміжна провідність двох вузлів?
- 47 Як знаходять струми у гілках за методом вузлових потенціалів?
- 48 Що таке вхідний опір та вхідна провідність двополюсника?
- 49 Чому дорівнює ЕРС еквівалентного генератора?
- 50 Як знаходять струм у гілці за методом еквівалентного генератора?

- 51 Теорема компенсації.
- 52 Теорема взаємності.
- 53 Режими роботи електричного кола (холостий хід, коротке замикання, узгоджений та номінальний).

Список літератури

- 1 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2000.
- 2 Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Под ред. Л.А.Бессонова. – М.: Высшая школа, 2000.
- 3 Завдання та методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» (№ 966). – Харків: УкрДАЗТ, 2002 – Ч.1.

Додаток А

Основні електричні величини розділу

«Електричні кола постійного струму»

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	
Заряд електричний	Q, q	Кл	Кулон
Струм	I, J	А	Ампер
Щільність струму	J	A/m^2	Ампер на метр квадратний
Потенціал	φ	В	Вольт
Електрорушійна сила	E	В	Вольт
Напруга	U	В	Вольт
Опір	R, r	Ом	Ом
Провідність	G, g	См	Сименс
Потужність	P	Вт	Ват

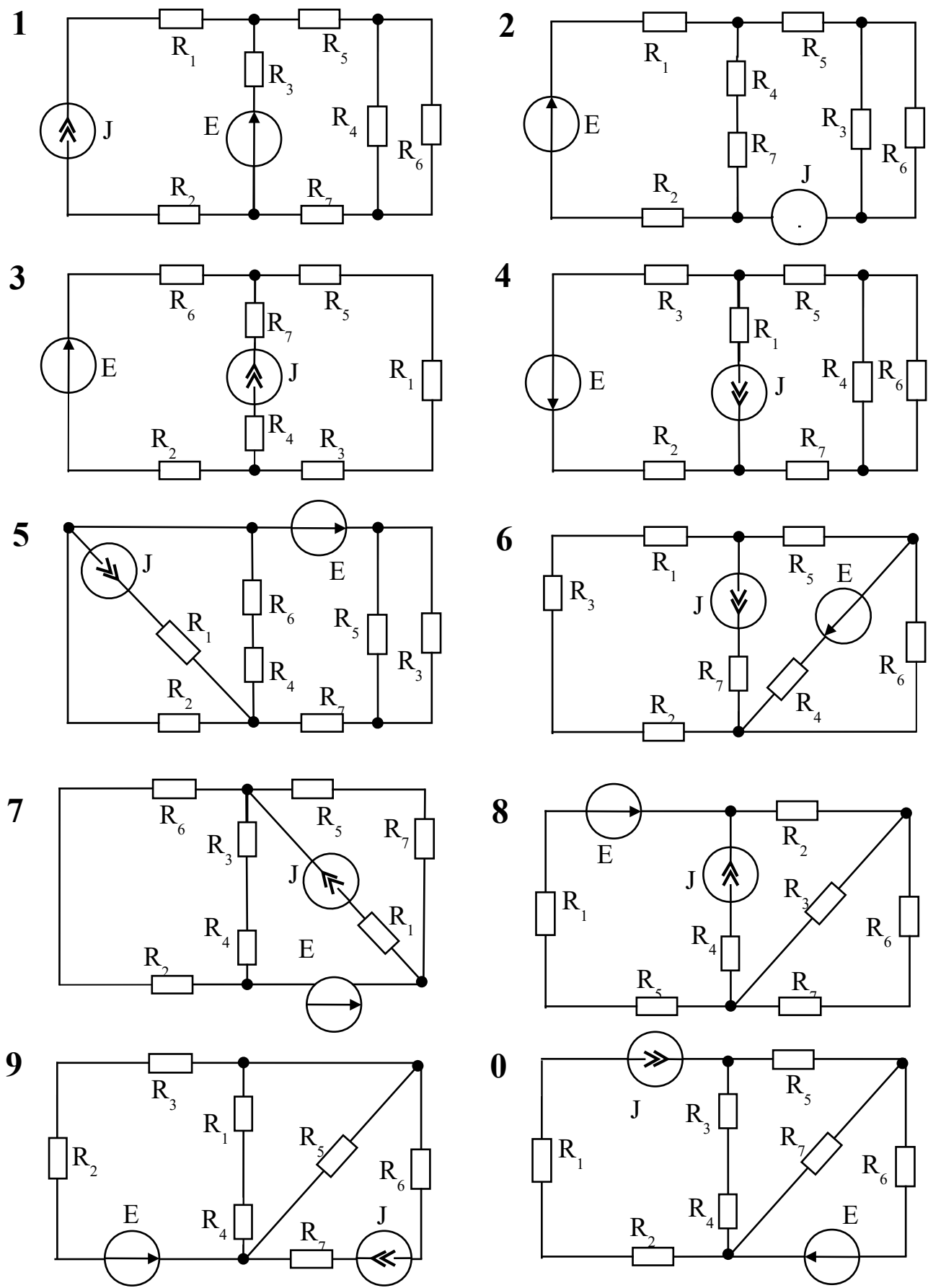


Рисунок 4.1.

