

Методичні вказівки до розрахунку електричних кіл

ЗМІСТ

<i>Тема 1.</i> Поняття, класифікація, параметри, подання електричних кіл та їх елементів. Загальні властивості та закони лінійних електричних кіл.....	4
<i>Тема 2.</i> Розрахунок лінійних ланцюгів постійного струму методами перетворювання, пропорційного перерахунку, за законами Кірхгофа.....	14
<i>Тема 3.</i> Розрахунок лінійних ланцюгів методами контурних струмів та вузлових потенціалів.....	22
<i>Тема 4.</i> Розрахунок ланцюгів методами накладання, взаємності, еквівалентного генератора.....	30
<i>Тема 5.</i> Графо-аналітичний метод розрахунку нелінійних електричних кіл.....	38
<i>Тема 6.</i> Комплексний метод розрахунку ланцюгів синусоїдального струму з послідовним і паралельним з'єднанням R, L, C.....	45
Рекомендована література.....	58

Тема № 1. Поняття, класифікація, параметри, подання електричних кіл та їх елементів. Загальні властивості та закони лінійних електричних кіл.

Мета: Вивчити класифікацію та параметри електричних кіл. Засвоїти Загальні властивості та закони лінійних електричних кіл.

План:

1. Визначення та елементи електричного кола та схеми.
2. Основні закони електричних кіл

Основні терміни і поняття: електричне коло, елементи електричних кіл і схем, ЕРС, напруга, закон Ома для ділянки кола, що містить ЕРС та активні опори.

Короткі теоретичні відомості

Електричне коло - з'єднання джерел живлення, провідників, споживачів, вимірювальних приладів, призначених відповідно для створення, передавання, використання та контролю енергії електричного струму. Електричні кола підрозділяються на розгалужені і нерозгалужені. У всіх елементах нерозгалуженого кола діє однаковий струм. Нерозгалуженим називають електричне коло з послідовним з'єднанням його елементів.

Розгалуженим називають коло з паралельним або змішаним з'єднанням його ділянок.

Постійним називають струм, незмінний за часом, який являє собою спрямований рух часток, які несуть електричні заряди (в металах - вільні електрони, в рідинах - іони, в газах - електрони та іони).

Джерелом ЕРС називається джерело електроенергії, внутрішній опір якого значно менше опору зовнішньої схеми ($r_{\text{вн}} \ll R_{\text{н}}$), тому напруга на полюсах джерела $U = E - r_{\text{вн}} \cdot I_{\text{н}}$ при зміні величини струму в межах від нуля до $I_{\text{номін}}$ змінюється мало.

Джерело струму, навпаки має значно більший внутрішній опір ($r_{\text{вн}} \gg R_{\text{н}}$), тому струм $I_{\text{н}}$ кола практично не залежить від напруги на навантаженні при її зміні від нуля до $U_{\text{номін}}$.

Споживач струму (навантаження) - елемент електричного кола, у якому відбувається перетворення і споживання енергії електричного струму.

Під резистивним елементом або опором розуміють такий ідеалізований пасивний елемент, у якому електрична енергія перетворюється в інший вид енергії. Основне рівняння елемента, що зв'язує струм і напругу, його вольт-амперна характеристика, визначається законом Ома, що встановлює пропорційність напруги і струму:

$$U = I \cdot r. \quad (1.1)$$

Часто при розрахунках електричних кіл доцільно перетворювати схему в більш просту, еквівалентну вихідній. Основними видами перетворення пасивних віток, тобто віток, що не містять джерел енергії, є: заміна декількох послідовно з'єднаних опорів одним еквівалентним; заміна двох або більше паралельно з'єднаних віток однією еквівалентною; перетворення опорів, з'єднаних трикутником (зіркою), в еквівалентне з'єднання зіркою (трикутником).

Розглянемо наступні типи з'єднань елементів кола:

Послідовне з'єднання.

Ділянка кола, що містить кілька опорів, з'єднаних між собою послідовно, може бути замінений еквівалентним опором, рівним їх сумі.

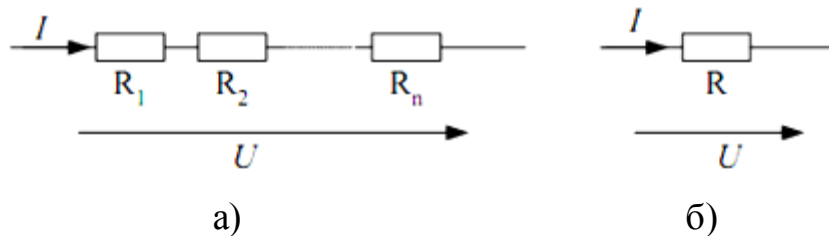


Рисунок. 1.1

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1.1)$$

Паралельне з'єднання.

Еквівалентна провідність ділянки кола, всі елементи якого з'єднані між собою паралельно, дорівнює сумі провідностей елементів.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.2)$$

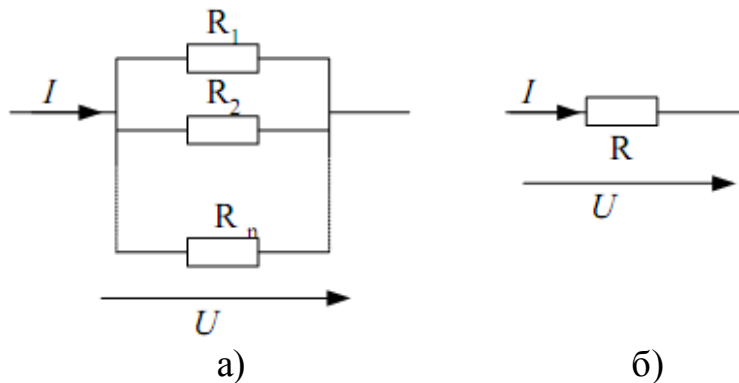


Рисунок. 1.2

Еквівалентний опір двох паралельно з'єднаних резисторів:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.3)$$

Для трьох і більше опорів ця формула несправедлива, необхідно користуватися формулою (1.2).

З'єднання зіркою і трикутником.

Ділянка кола, елементи в якому з'єднані «зіркою» (рис. 1.3 а), може бути замінена еквівалентною їй ділянкою, елементи в якій з'єднані «трикутником» (рис. 1.3 б). При цьому елементи однієї зі схем пов'язані з елементами іншої за допомогою формул перетворення.

Формули для перетворення з «зірки» в «трикутник»:

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a}, \\ R_B &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_b}, \\ R_C &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_c} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Формули для перетворення з «трикутника» в «зірку»:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C}, \\ R_b &= \frac{R_C R_A}{R_A + R_B + R_C}, \\ R_c &= \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Дані формули можна застосовувати тільки якщо в схемі між точками А, В і С немає джерел.

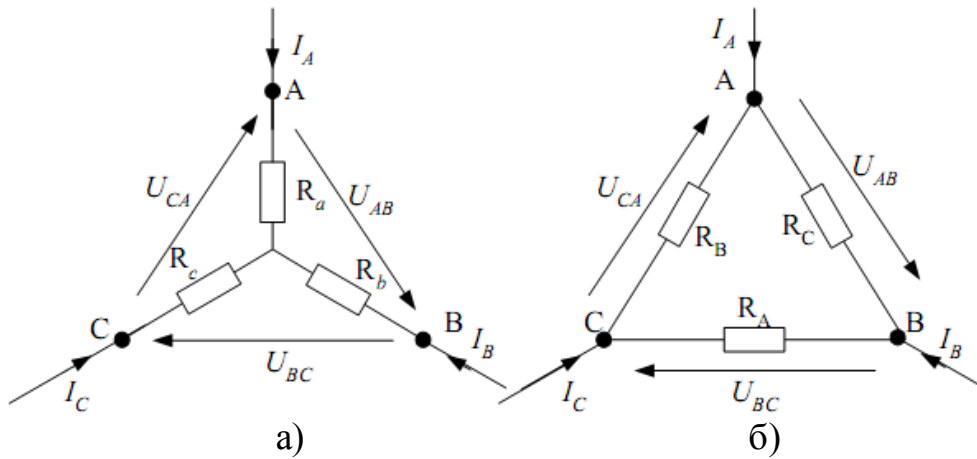


Рисунок.1.3

Приклади розв'язання задач

Задача 1.1. Для кола, зображеного на рис. 1.4, обчислити струми у всіх гілках і напругу між точками а і б. Параметри елементів схеми: $E=5$ В, $R_1=10$ Ом, $R_2=200$ Ом, $R_3=80$ Ом, $R_4=160$ Ом.

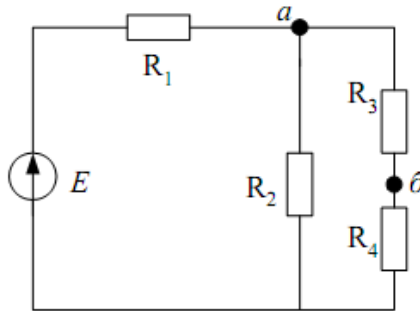


Рисунок.1.4

Розв'язування. Розглянуте коло містить одне джерело ЕРС і складається з трьох гілок і двох вузлів. Виберемо напрямки струмів від «+» до «-» (рис. 1.5)

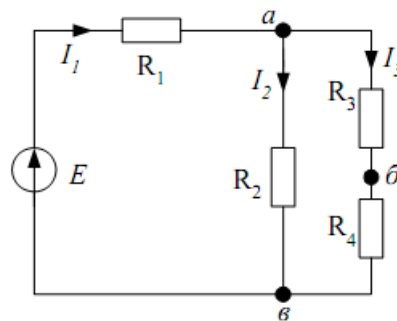


Рисунок.1.5

Знайдемо струм в гілці джерела. Для цього замінимо з'єднання резисторів

еквівалентним опором R . Ділянка, розташована між точками a і b , з'єднана послідовно з опором R_1 . Опір R_2 з'єднаний паралельно з ділянкою кола, що містить послідовне з'єднання R_3 і R_4 . Отже, отримуємо:

$$R_{234} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{(R_3 + R_4)}} = \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = 109 \text{ Ом.}$$

$$R = R_1 + R_{234} = R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = 10 + \frac{200(80 + 160)}{200 + 80 + 160} = 119 \text{ Ом.}$$

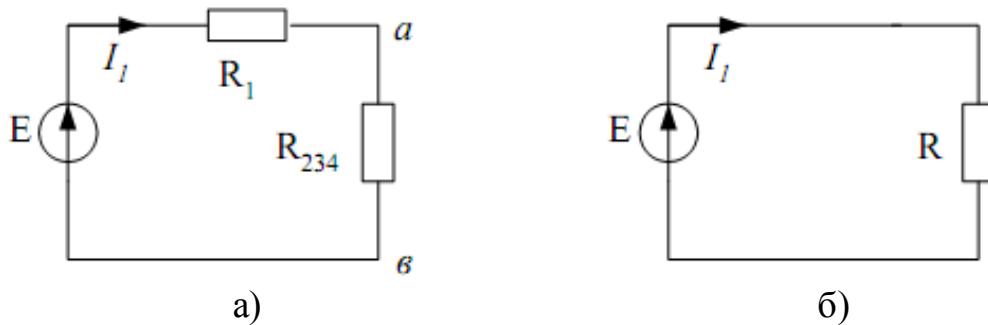


Рисунок 1.6 Еквівалентні схеми

Знайдений струм

$$I_1 = \frac{E}{R} = \frac{5}{119} = 0.042 \text{ А}$$

Потім знайдемо напругу між точками a та b .

$$U_{ab} = I_3 * R_3 = 0,019 * 80 = 1,52 \text{ В.}$$

Задача 1.2. Для схеми, зображеної на рис. 1.7, визначити силу струму в гілці джерела. Параметри елементів схеми: $E=5 \text{ В}$, $R_0=10 \text{ Ом}$, $R_1=200 \text{ Ом}$, $R_2=80 \text{ Ом}$, $R_3=80 \text{ Ом}$, $R_4=80 \text{ Ом}$, $R_5=160 \text{ Ом}$.

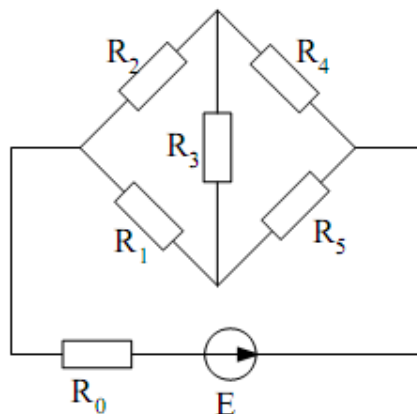


Рисунок 1.7

Розв'язування. З'єднання такого типу, як показано на рис 2.7, називається мостовим з'єднанням. Воно не може бути розглянуте, як сукупність послідовних і паралельних з'єднань. Для зведення його до послідовних і паралельних з'єднань необхідно використовувати формули для перетворення “зірка-трикутник” або “трикутник-зірка”.

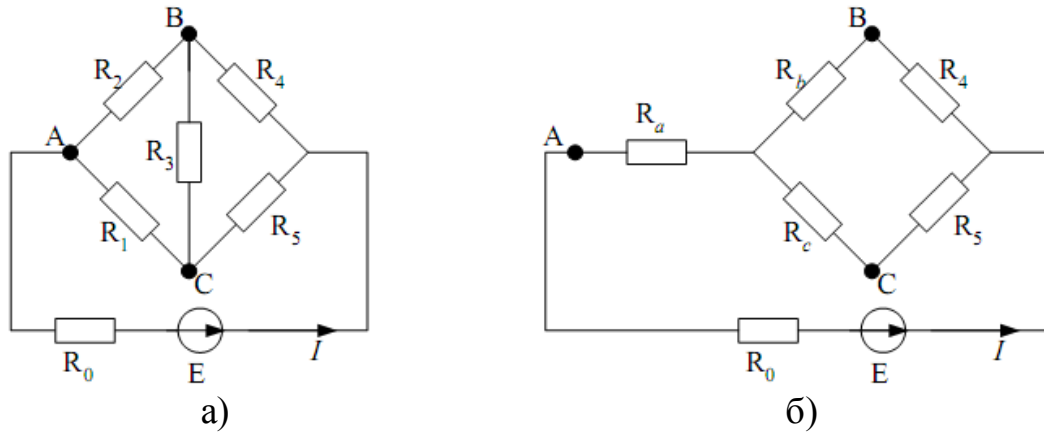


Рисунок 1.8

Перетворимо трикутник між точками А, В і С (рис. 1.8 а) в зірку (рис 1.8.б). Скористаємося формулами перетворення (1.5). Підставляємо в ці формули: $R_A = R_3, R_B = R_1, R_C = R_2$.

Отримаємо елементи схеми 1.8 б.

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 44.3 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 17.8 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 44.4 \text{ Ом}$$

Далі, розглядаємо схему 1.8 б. Елементи R_b і R_4 так само як і R_c і R_5 з'єднані між собою послідовно, в той же час, гілка, яка містить R_b і R_4 , з'єднана з гілкою, що містить, R_c і R_5 паралельно. Отримаємо для еквівалентного опору формулу, і обчислимо його:

$$R = R_0 + R_a + \frac{(R_b + R_4)(R_c + R_5)}{R_b + R_4 + R_c + R_5} = 121 \text{ Ом.}$$

Тоді струм обчислюється за формулою:

$$I = \frac{E}{R} = 0.041 \text{ А.}$$

Розв'язання задач

1. Перетворити схему (рис. 1.9) до одноконтурної, якщо $E=100$ В, $r_1=24$ Ом, $r_2=4$ Ом, $r_3=12$ Ом, $r_4=12$ Ом, $r_5=6$ Ом, $r_6=18$ Ом.

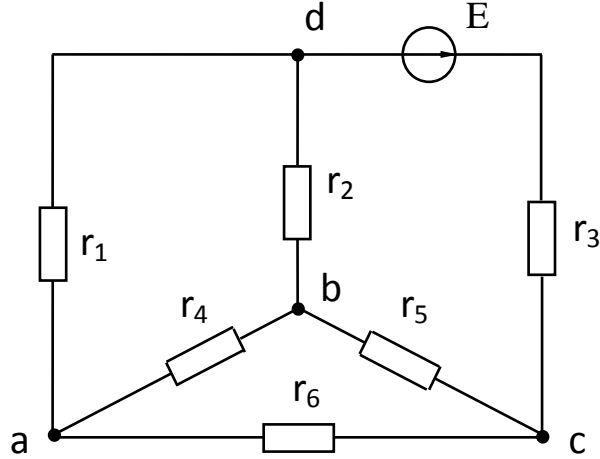


Рисунок 1.9

2. Розрахувати струми та напруги на ділянках кола, схема якого приведена на малюнку, методом згортання кола. Побудувати потенціальну діаграму для контура 1-2-3-4-5-1. Вихідні дані: $E=110$ В; $R_0=1$ Ом; $R_1=5$ Ом; $R_2=20$ Ом; $R_3=14$ Ом; $R_4=6$ Ом; $R_5=4$ Ом.

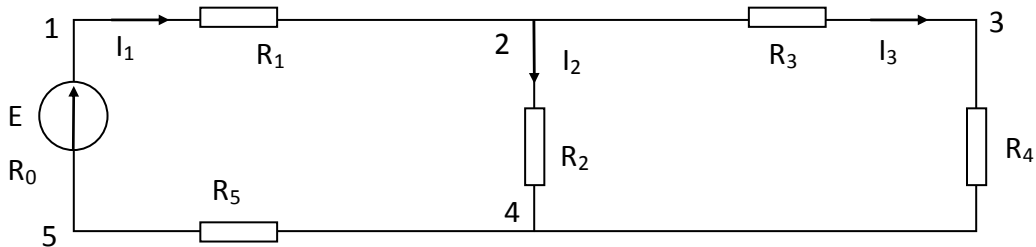
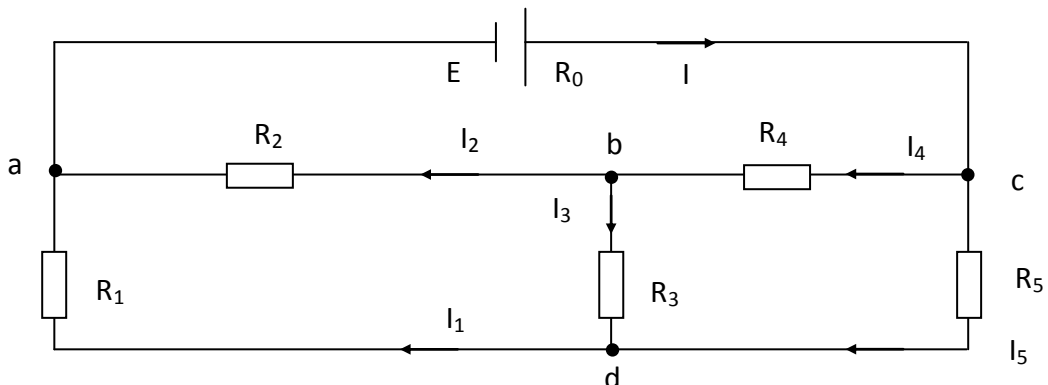


Рисунок. 1.10

3. Розрахувати струми віток у схемі приведений на малюнку методом перетворення зірки опорів в еквівалентний трикутник. Вихідні дані: $E=100$ В; $R_0=1$ Ом; $R_1=20$ Ом; $R_2=4$ Ом; $R_3=4$ Ом; $R_4=8$ Ом; $R_5=2$ Ом.



Питання для самоконтролю

1. Дати означення електричного кола. Назвати його основні елементи.
2. Пояснити, що являє собою електричний струм у резисторі, твердому тілі, розчині, газі.
3. Дати означення потенціалу, спаду напруги на ділянці кола, спаду напруги на елементі кола.
4. Вказати ознаки лінійного електричного кола.
5. Якими параметрами характеризуються джерело ЕРС, джерело струму?
6. Сформулювати закон Ома для ділянки кола.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Розрахувати струми віток у схемі приведеній на малюнку методом перетворення “трикутника опорів” в еквівалентну зірку. Вихідні дані: $E = 100$ В; $R_0 = 10$ Ом; $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 4$ Ом; $R_4 = 8$ Ом; $R_5 = 2$ Ом.

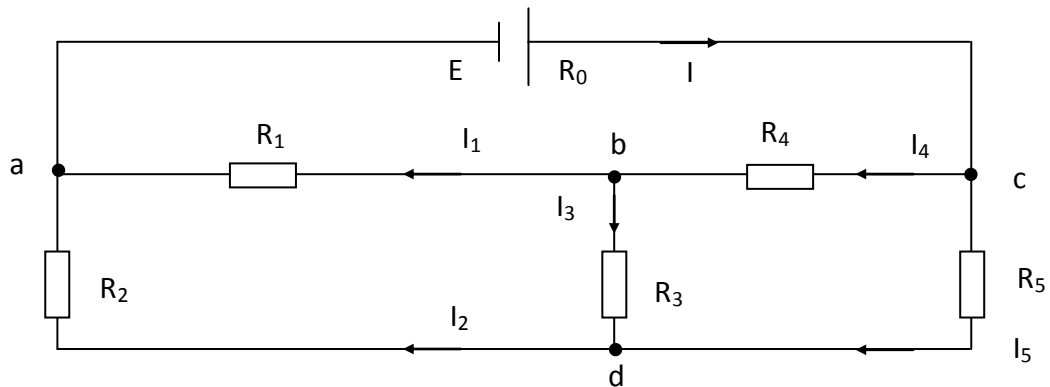


Рисунок 1.11

2. Розрахувати струми та напруги на ділянцях кола методом згортання схеми. Електрична схема приведена на малюнку. Вихідні дані: $U = 200$ В; $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 4$ Ом; $R_3 = 8$ Ом; $R_4 = 10$ Ом; $R_5 = 6$ Ом.

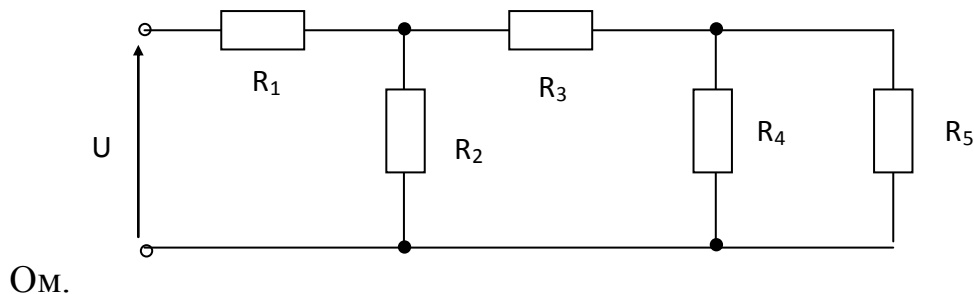


Рисунок 1.12

3. Розрахувати струми на ділянках кола для схеми приведеної на малюнку. Розрахунок провести двома способами:
– перетворенням зірки опорів на еквівалентний трикутник;

– перетворенням трикутника опорів в еквівалентну зірку.
Порівняти результати розрахунків.

Вихідні дані: $E = 100 \text{ В}$; $R_0 = 2 \text{ Ом}$; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 5 \text{ Ом}$; $R_3 = 8 \text{ Ом}$;
 $R_4 = 10 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$

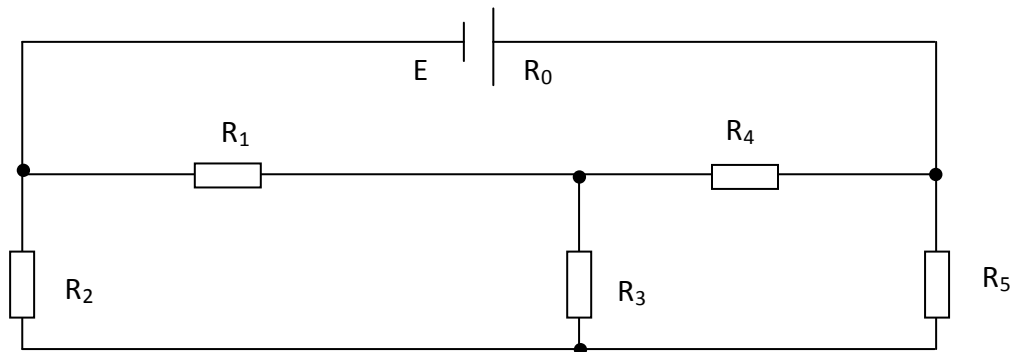


Рисунок 1.13

Тема 2. Розрахунок лінійних ланцюгів постійного струму методами перетворювання, пропорційного перерахунку, за законами Кірхгофа.

Мета: Навчитися застосовувати методи розрахунків лінійних ланцюгів постійного струму.

План

1. Метод перетворення.
2. Метод пропорційного перерахунку.
3. Метод розрахунку електричних кіл: за законами Кірхгофа.

Основні терміни та поняття: вузол, гілка, незалежний контур, обхід контура.

Методичні рекомендації

Часто розрахунок електричних кіл постійного струму можна значно полегшити еквівалентним перетворенням схем окремих ділянок кола одного виду на схеми іншого виду. При цьому необхідно використовувати всі правила еквівалентних перетворень, які найбільш придатні до розв'язування задачі.

Розглянемо найбільш типові методи перетворення.

При послідовному з'єднанні елементів через них протікає той самий струм I . Відповідно до другого закону Кірхгофа, напруга, прикладена до всього кола

$$U = \sum_k U_k, \quad (2.1)$$

де k - кількість елементів.

Для послідовно з'єднаних опорів r_1, r_2, \dots, r_n , з врахуванням (2.1) будемо мати

$$U = I \sum_k r_k = I r_{\text{екв}}, \quad (2.2)$$

Струм у колі з послідовним з'єднанням елементів дорівнює:

$$I = \frac{U}{r_{\text{екв}}}, \quad (2.3)$$

а напруга на n -ому елементі дорівнює

$$U = \frac{U}{r_{\text{екв}}} r_n, \quad (2.4)$$

При послідовному з'єднанні джерел напруги вони замінюються одним еквівалентним джерелом з напругою $U_{\text{екв}}$, рівною алгебраїчній сумі напруг окремих джерел.

З'єднання груп елементів, при якому всі елементи перебувають під тою самою напругою, називається паралельним. Відповідно до першого закону Кірхгофа, струм всього кола I дорівнює алгебраїчній сумі струмів у паралельних гілках, тобто

$$I = \sum_k I_k, \quad (2.5)$$

На підставі цього рівняння для паралельного з'єднання резистивних елементів одержуємо:

$$I = U \sum_k g_k = U g_{\text{екв}}, \quad (2.6)$$

де $g_{\text{екв}} = \sum_k g_k$ - еквівалентна провідність.

Струми паралельно з'єднаних гілок при $U = \text{const}$ не залежать один від одного і визначаються за формулою:

$$I_k = \frac{U}{r_k} = U \cdot g_k, \quad (2.7)$$

При збільшенні числа паралельних гілок еквівалентна провідність електричного кола зростає, а еквівалентний опір відповідно зменшується. Це приводить до збільшення струму I . Якщо напруга залишається постійною, то

збільшується також загальна потужність P . Струми і потужності попередніх гілок не змінюються.

Для обчислення струмів у всіх гілках схеми можна скласти систему рівнянь, що складається з виразів для першого і другого законів Кірхгофа. Ці вирази лінійні відносно струмів, тому виходить алгебраїчна лінійна неоднорідна система рівнянь. Порядок системи повинен бути рівний числу невідомих струмів, а отже, числу гілок схеми.

Нехай ми маємо коло, що містить p гілок і q вузлів. Тоді для $q-1$ вузлів ми можемо записати $q-1$ незалежних виразів для першого закону Кірхгофа. Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів у вітках, що сходяться до одного вузла кола, дорівнює нулю.

Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума ЕРС будь-якого замкненого контуру електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі спаду напруг на елементах цього контуру.

Решта рівняння (їх $n = p - (q-1)$) ми повинні отримати з другого закону Кірхгофа, сформулювавши його для n незалежних контурів. Незалежні контури вибираються довільно, так, щоб кожний наступний відрізнявся від сполучень попередніх хоча б однією новою гілкою. Існує інша умова: при виборі даної кількості (N) незалежних контурів не повинно залишитися гілок які не входять ні в один контур.

Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума ЕРС будь-якого замкненого контуру електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі спаду напруг на елементах цього контуру.

Приклади розв'язання задач

Задача 2.1. Знайти струми у всіх гілках схеми, зображеної на рис 2.1. Параметри схеми: $E_1=15$ В, $E_2=25$ В, $R_1=340$ Ом, $R_2=525$ Ом, $R_3=115$ Ом.

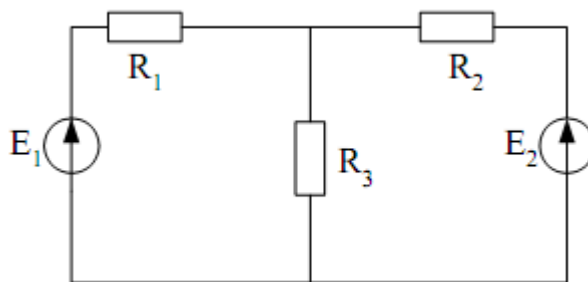


Рисунок 2.1

Розв'язування. Виберемо напрямки струмів в гілках, як показано на рис 2.2. Схема містить три гілки і два вузла. Отже, для неї можна сформулювати один вираз для першого закону Кірхгофа і два вирази для другого закону Кірхгофа. Незалежні контури та напрями їх обходу вибираємо відповідно до

рис. 2.2. Отримасмо систему з трьох рівнянь для трьох невідомих струмів.

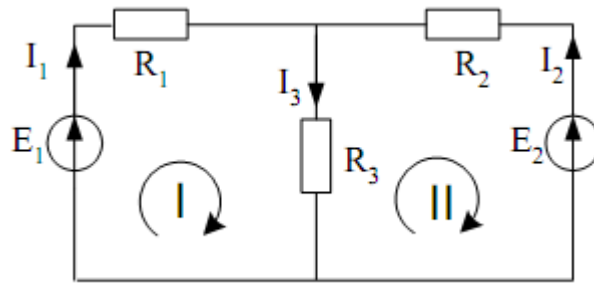


Рисунок 2.2

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 &= E_1 \\ -I_2 R_2 - I_3 R_3 &= -E_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Знак «-» в останньому рівнянні поставлений тому, що напрямки струмів і ЕРС на збігаються з напрямом обходу контуру. Вирішимо цю систему методом перетворень. Перетворюючи перше з рівнянь (2.6) і підставляючи вираз для в друге і третє рівняння, отримаємо

$$I_3 = I_1 + I_2$$

;

$$I_2(R_2 + R_3) + I_1 R_3 = E_1,$$

і звідси

$$I_1 = \frac{E_1 - I_2 R_3}{(R_1 + R_3)}$$

Підставляючи отриманий вираз для I_1 в третє рівняння (2.6),

$$I_2(R_1 + R_3) + I_2 R_3 = E_2$$

отримаємо

$$I_2(R_2 + R_3) + \frac{E_1 - I_2 R_3}{(R_1 + R_3)} R_3 = E_2$$

і відповідно

$$I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 R_3 R_1} = 0.059 \text{ А.}$$

2.2. Скласти рівняння за законами Кірхгофа для схеми (рис. 7), якщо $E_1=40 \text{ В}$, $E_2=20 \text{ В}$, $r_1=20 \text{ Ом}$, $r_2=20 \text{ Ом}$, $r_3=40 \text{ Ом}$, $r_4=20 \text{ Ом}$, $r_5=5 \text{ Ом}$, $r_6=5 \text{ Ом}$.

Розв'язування. Вибираємо довільно напрямки струмів у гілках, як показано на рис.2.2. В схемі три вузли ($n=3$), тому за першим законом Кірхгофа складаємо $(n-1)=2$ рівняння.

Для вузла а

$$I_1 - I_3 + I_4 + I_5 = 0;$$

Для вузла б

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0.$$

За другим законом Кірхгофа необхідно скласти $m - (n-1)$ рівнянь, тобто для даної схеми $5 - (3-1) = 3$ рівняння. При вибраних напрямках обходу контурів

$$r_1 \cdot I_1 + r_3 \cdot I_3 = E_1;$$

$$-r_2 \cdot I_2 - r_3 \cdot I_3 - r_4 \cdot I_4 = -E_2;$$

$$-r_4 \cdot I_4 + (r_5 + r_6) \cdot I_5 = 0.$$

Підставляючи числові значення, одержуємо систему рівнянь:

$$I_1 - I_3 + I_4 + I_5 = 0;$$

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$20 \cdot I_1 + 40 \cdot I_3 = 40;$$

$$-20 \cdot I_2 - 40 \cdot I_3 - 20 \cdot I_4 = -20;$$

2.3 Розрахувати струми і напруги на ділянках кола схема якого приведена на рисунку. Вихідні дані $E_1 = 100$ В; $E_2 = 160$ В; $R_{01} = 1$ Ом; $R_1 = 9$ Ом; $R_{02} = 2$ Ом; $R_2 = 13$ Ом; $R_3 = 10$ Ом.

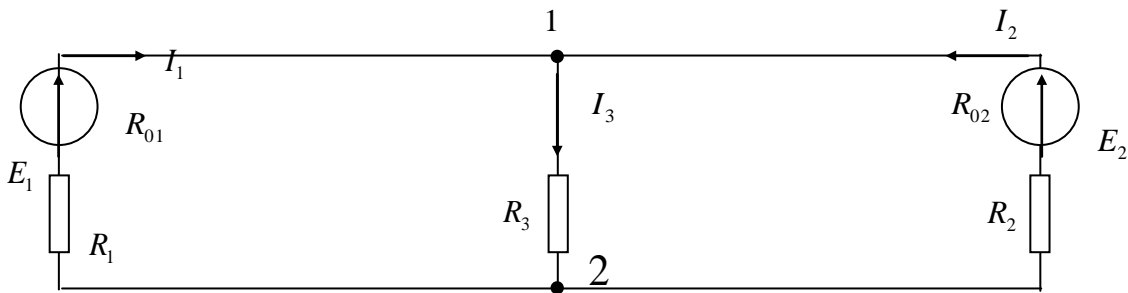


Рисунок 2.3

Розв'язування:

1. Вибираємо напрямки струмів у вітках схеми.

2. За першим законом Кірхгофа складаємо:

$n-1=2-1=1$ рівняння;

де $n=2$ — кількість вузлів у схемі;

За другим законом Кірхгофа складаємо:

$m-(n-1)=3-(2-1)=2$ рівняння

де $m=3$ — кількість віток у схемі.

Отримаємо систему з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 \cdot (R_{01} + R_1) + I_3 \cdot R_3 = E_1 \\ I_2 \cdot (R_{02} + R_2) + I_3 \cdot R_3 = E_2 \end{cases}$$

3. Рішаємо отриману систему рівнянь та знаходимо струми віток схеми.

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 \cdot (1+9) + I_3 \cdot 10 = 100 \\ I_2 \cdot (2+13) + I_3 \cdot 10 = 160 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 10I_1 + 10I_3 = 100 \\ 15I_2 + 10I_3 = 160 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 + I_3 = 10 \\ 3I_2 + 2I_3 = 32 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \end{vmatrix} = 1 \cdot 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 3 \cdot (-1) - 0 \cdot 0 \cdot (-1) - 1 \cdot 1 \cdot 2 - 1 \cdot 1 \cdot 3 = 0 + 0 - 3 - 0 - 2 - 3 = -8$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 10 & 0 & 1 \\ 32 & 3 & 2 \end{vmatrix} = 0 \cdot 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 \cdot 32 + 10 \cdot 3 \cdot (-1) - 32 \cdot 0 \cdot (-1) - 1 \cdot 10 \cdot 2 - 3 \cdot 1 \cdot 0 = 0 + 32 - 30 - 0 - 20 - 0 = -18$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 10 & 1 \\ 0 & 32 & 2 \end{vmatrix} = 1 \cdot 10 \cdot 2 + 0 \cdot 0 \cdot 1 + 1 \cdot 32 \cdot (-1) - 0 \cdot 10 \cdot (-1) - 1 \cdot 0 \cdot 2 - 1 \cdot 1 \cdot 32 =$$

$$= 20 + 0 - 32 - 0 - 0 - 32 = -44$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 10 \\ 0 & 3 & 32 \end{vmatrix} = 1 \cdot 0 \cdot 32 + 0 \cdot 10 \cdot 1 + 0 \cdot 1 \cdot 3 - 0 \cdot 0 \cdot 0 - 1 \cdot 1 \cdot 32 - 1 \cdot 10 \cdot 3 =$$

$$= 0 + 0 + 10 - 0 - 32 - 30 = -62$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-18}{-8} = 2.25 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-44}{-8} = 5.5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-62}{-8} = 7.75 \text{ A}$$

Питання для самоконтролю

1. Дати означення розгалуженого електричного кола і його основних елементів.
2. Сформулювати закон Ома для ділянки кола з ЕРС.
3. Сформулювати перший і другий закони Кірхгофа.
4. Скільки незалежних рівнянь можна скласти, використовуючи перший і другий закони Кірхгофа для схеми, яка складається з трьох вузлів і шести гілок?

Задачі для самостійного розв'язання

Для електричного кола, у відповідності з номером варіанта, що зображений в таблиці визначити струми в усіх гілках використовуючи закони Кірхгофа.

варіант	рис.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	E1	E2	E3
1	2.4	13	5	2	8	11	15	-	12	16
2	2.5	8	10	6	15	21	28	-	25	14
3	2.6	4	13	9	10	5	6	62	16	-
4	2.7	12	35	22	12	35	22	8	10	-
5	2.8	4	11	5	12	7	8	-	45	25

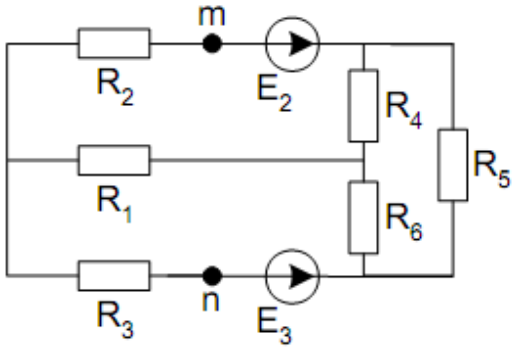


Рисунок 2.4

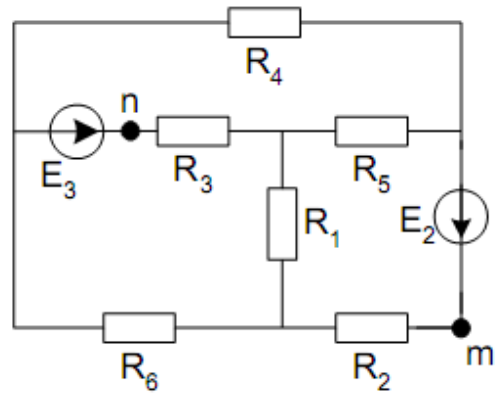


Рисунок 2.5

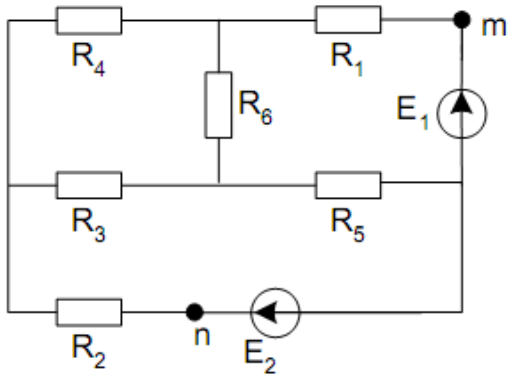


Рисунок 2.6

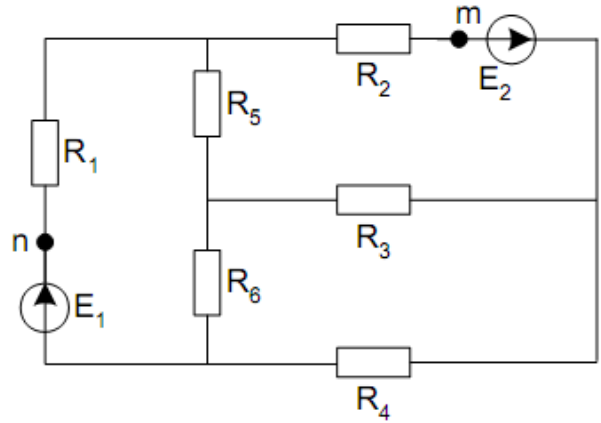


Рисунок 2.7

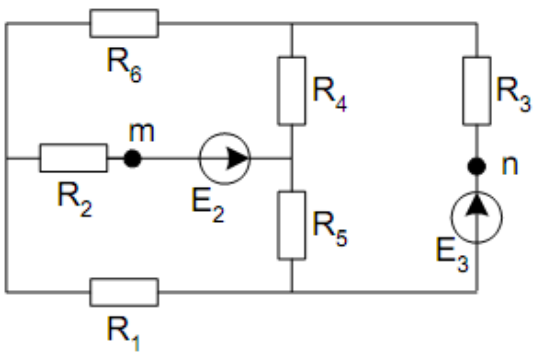


Рисунок 2.8

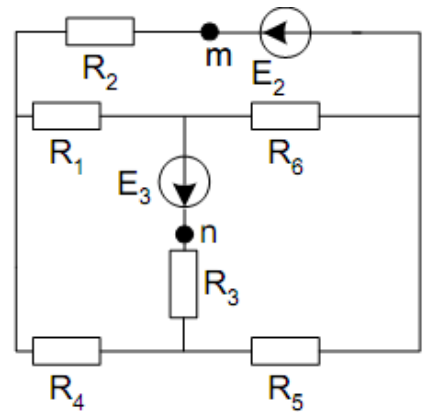


Рисунок 2.9

Рисунок 3.1

Розв'язування. Дане коло містить шість гілок і чотири вузли. Отже, ми можемо вибрати три незалежних контури. Позначимо струми в гілках $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$. Контурні струми позначимо I_I, I_{II}, I_{III} . Виберемо їх напрямки, як показано на рис. 3.1.

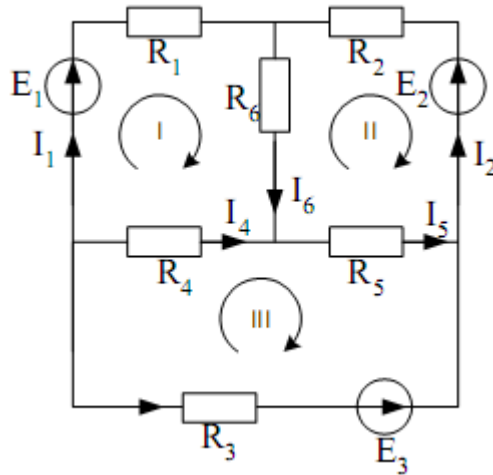


Рисунок 3.2

Складемо систему рівнянь для знаходження контурних струмів.

$$\begin{aligned} R_{11}I_I + R_{12}I_{II} + R_{13}I_{III} &= E_I; \\ R_{21}I_I + R_{22}I_{II} + R_{23}I_{III} &= E_{II}; \\ R_{31}I_I + R_{32}I_{II} + R_{33}I_{III} &= E_{III}. \end{aligned}$$

Де $R_{11}=R_1+R_4+R_6$, $R_{22}=R_2+R_5+R_6$, $R_{33}=R_3+R_4+R_5$, $R_{12}=R_{21}=-R_6$,
 $R_{23}=R_{32}=-R_5$, $R_{13}=R_{31}=-R_4$, $E_I=E_1$, $E_{II}=-E_2$, $E_{III}=-E_3$.

Запишемо систему рівнянь у матричному вигляді і розв'яжемо її.

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_I \\ E_{II} \\ E_{III} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 80 & -10 & -30 \\ -10 & 105 & -70 \\ -30 & -70 & 115 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ -25 \\ -5 \end{pmatrix};$$

$$I_I = \frac{\begin{vmatrix} E_I & R_{12} & R_{13} \\ E_{II} & R_{22} & R_{23} \\ E_{III} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}} = 0,017 \text{ A}$$

$$I_{II} = \frac{\begin{vmatrix} R_{11} & E_I & R_{13} \\ R_{21} & E_{II} & R_{23} \\ R_{31} & E_{III} & R_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}} = -0,442 \text{ A}$$

$$I_{III} = \frac{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & E_I \\ R_{21} & R_{22} & E_{II} \\ R_{31} & R_{32} & E_{III} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}} = -0,308 \text{ A}$$

Тепер, коли знайдені контурні струми, знайдемо струми в гілках. Перша, друга і третя гілка належать тільки першому, другому і третьому контуру, відповідно. Тому струми в них будуть рівні контурним, з точністю до знака. З урахуванням обраних напрямків отримаємо $I_1 = I_I = 0,017 \text{ A}$, $I_2 = -I_{II} = 0,442 \text{ A}$, $I_3 = -I_{III} = 0,308 \text{ A}$,. Струми в інших гілках є суперпозицією контурних струмів що протікають через гілки. Отримаємо:

$$\begin{aligned} I_4 &= I_{III} - I_I = -0,308 - 0,017 = -0,325 \text{ A}, \\ I_5 &= I_{III} - I_{II} = -0,308 + 0,442 = 0,134 \text{ A}, \\ I_6 &= I_I - I_{II} = 0,017 + 0,442 = 0,459 \text{ A}. \end{aligned}$$

Задача 3.5. Знайти струми у всіх гілках схеми 3.3 методом вузлових потенціалів. Параметри елементів схеми ті ж, що і в задачі 3.2.

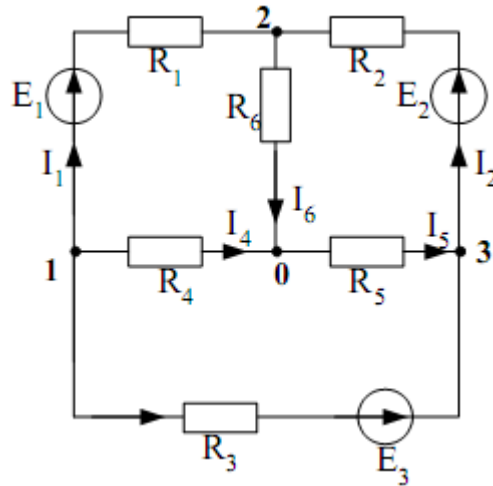


Рисунок 3.3

Розв'язок. Нехай $\varphi_0=0$. Позначимо $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ потенціали у вузлах 1, 2, 3 відносно нульового вузла(рис.3.3). Складемо для їх обчислення систему рівнянь.

$$\begin{aligned} Y_{11}\varphi_1 + Y_{12}\varphi_2 + Y_{13}\varphi_3 &= J_1 \\ Y_{21}\varphi_1 + Y_{22}\varphi_2 + Y_{23}\varphi_3 &= J_2 \\ Y_{31}\varphi_1 + Y_{32}\varphi_2 + Y_{33}\varphi_3 &= J_3 \end{aligned}$$

В цій системі

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3}, \\ Y_{22} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2}, \\ Y_{33} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3} \end{aligned}$$

- власні провідності вузлів 1, 2, і 3, відповідно.

взаємні провідності-

$$\begin{aligned} Y_{12} = Y_{21} &= -\frac{1}{R_1}, \\ Y_{23} = Y_{32} &= -\frac{1}{R_2}, \\ Y_{13} = Y_{31} &= -\frac{1}{R_3}. \end{aligned}$$

Вузлові струми дорівнюють:

$$J_1 = -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_3}{R_3},$$

$$J_2 = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2},$$

$$J_3 = -\frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}.$$

Підставивляючи числові значення, отримаємо систему рівнянь, записану в матричному вигляді:

$$\begin{pmatrix} 0,125 & 0,025 & 0,066 \\ 0,025 & 0,165 & 0,040 \\ 0,066 & 0,040 & 0,121 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,708 \\ 1,375 \\ -0,666 \end{pmatrix}$$

Розв'язуючи систему, одержимо значення потенціалів у вузлах. Випишемо відразу рішення $\varphi_1 = -9,745$ В, $\varphi_2 = 4,586$ В, $\varphi_3 = -9,366$ В. Знаючи значення потенціалів отримаємо значення струмів в гілках, користуючись законом Ома.

$$I_1 = \frac{U_{12} + E_1}{R_1} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1}{R_1} = 0,017 \text{ А};$$

$$I_1 = \frac{U_{32} + E_2}{R_2} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_2}{R_2} = 0,442 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{U_{13} + E_3}{R_3} = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_3}{R_3} = 0,308 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{U_{10}}{R_4} = \frac{\varphi_1 - 0}{R_4} = \frac{\varphi_1}{R_4} = -0,325 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{U_{03}}{R_5} = \frac{-\varphi_3}{R_5} = 0,134 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{U_{20}}{R_6} = \frac{\varphi_2}{R_6} = 0,459 \text{ А}.$$

Розв'язання задач

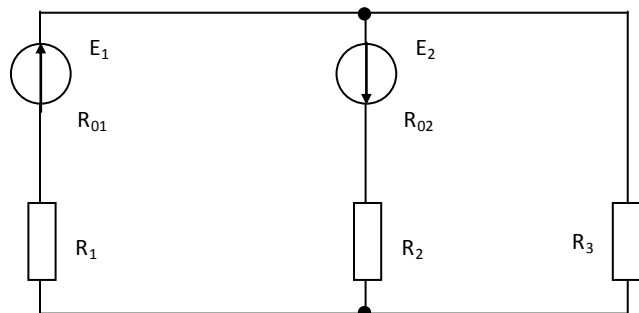
1. Розрахувати струми та напруги на ділянках кола методом вузлових та контурних рівнянь. Скласти рівняння балансу потужностей.

Вихідні дані: $E_1 = 100$ В;

$E_2 = 80$ В; $R_{01} = 2$ Ом;

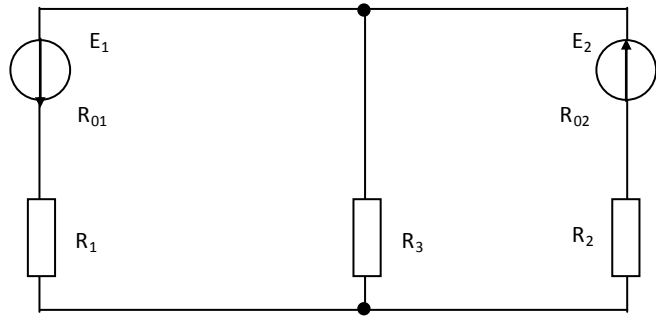
$R_{02} = 2$ Ом; $R_1 = 8$ Ом;

$R_2 = 18$ Ом; $R_3 = 10$ Ом.



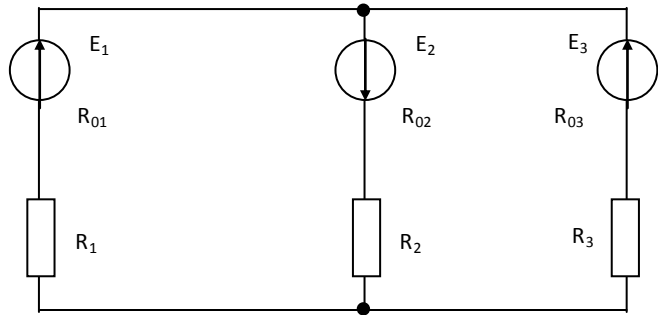
2. Розрахувати струми та напруги на ділянках кола методом вузлових та контурних рівнянь. Скласти рівняння балансу потужностей.

Вихідні дані: $E_1 = 100$ В;
 $E_2 = 200$ В; $R_{01} = R_{02} = 2$ Ом;
 $R_1 = 8$ Ом; $R_2 = 18$ Ом;
 $R_3 = 20$ Ом.



3. Розрахувати струми та напруги на ділянках кола методом вузлових та контурних рівнянь. Скласти рівняння балансу потужностей.

Вихідні дані: $E_1 = 100$ В;
 $E_2 = 60$ В; $E_3 = 100$ В;
 $R_{01} = R_{02} = R_{03} = 2$ Ом;
 $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 7$ Ом; $R_3 = 9$ Ом.



Питання для самоконтролю

1. Пояснити сутність методу вузлових потенціалів.
2. Що таке контурний струм?
3. У чому різниця між контурним струмом і струмом гілки?
4. Викласти сутність методу контурних струмів.
5. Назвати основні властивості електричних кіл постійного струму.

Задачі для самостійного розв'язання

Для електричного кола, у відповідності з номером варіанта, що зображений в таблиці визначити струми в усіх гілках використовуючи методи вузлових та контурних рівнянь.

варіант	рис.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	E1	E2	E3
1	3.5	4	11	5	12	7	8	-	45	25
2	3.6	5	10	12	7	8	15	-	15	13
3	3.7	130	40	60	80	110	45	-	18	12
4	3.8	55	80	100	40	70	120	-	26	10
5	3.9	7	12	4	9	15	8	-	20	8
6	3.10	110	60	45	150	80	50	-	60	12

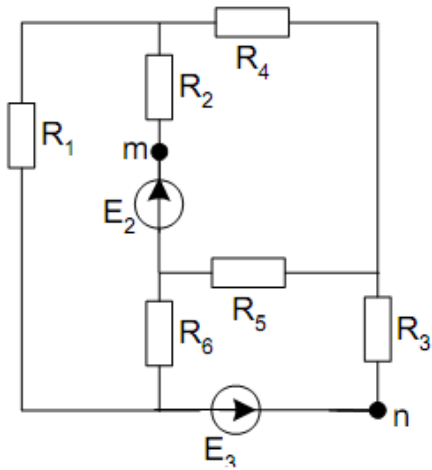


Рисунок 3.5

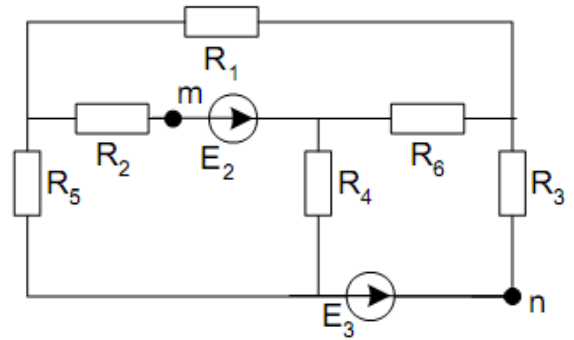


Рисунок 3.6

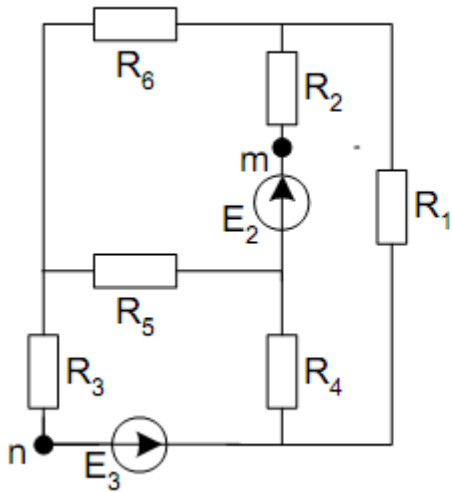


Рисунок 3.7

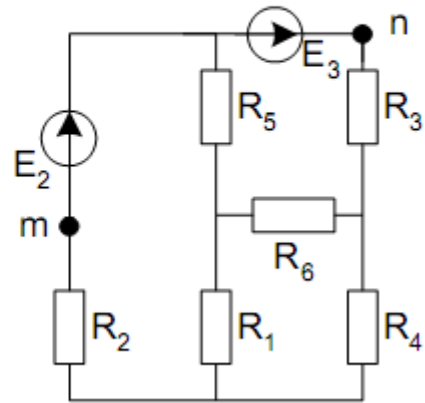


Рисунок 3.8

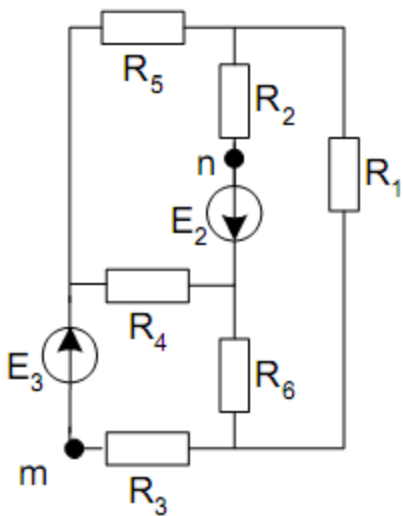


Рисунок 3.9

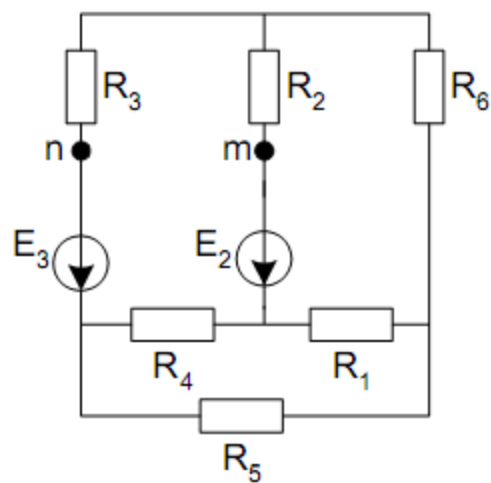


Рисунок 3.10

Тема 4. Розрахунок ланцюгів методами накладання, взаємності, еквівалентного генератора.

Мета: Навчитися застосовувати методи накладання, взаємності та еквівалентного генератора.

План

1. Метод накладання.
2. Метод взаємності.
3. Метод еквівалентного генератора.

Основні терміни та поняття: контур, гілка, сила струму, ЕРС, провідність.

Методичні рекомендації

При розрахунку за методом накладання струм у будь-якій гілці електричного кола визначається як алгебраїчна сума струмів, викликаних у даній гілці кожною з ЕРС окремо, у припущенні рівності нулю всіх інших ЕРС.

Порядок розрахунку кола методом накладання такий. В електричному колі закорочують всі джерела ЕРС, крім одного. На їх місці лишається внутрішній опір джерел ЕРС. Виконують розрахунок електричного кола. Подібним чином роблять стільки разів, скільки знаходиться в колі джерел. Результуючий струм кожної гілки визначають як алгебраїчну суму струмів від всіх джерел.

Метод накладання досить зручний для аналізу процесів, що відбуваються в електричних колах при зміні їх параметрів.

Принцип взаємності заснований на теоремі взаємності, що сформулюємо без доказу: для лінійного кола струм I_k в k -ій гілці, викликаний єдиною в схемі ЕРС E_i , що перебуває в i -ій гілці,

$$I_k = g_i E_i, \quad (4.1)$$

дорівнює струму I_i в i -ій гілці, викликаному ЕРС E_k , чисельно рівній ЕРС E_i , що перебувала б в k -ій гілці,

$$I_i = g_k E_k, \quad (4.5)$$

Звідси зокрема впливає зазначене вище співвідношення $g_i = g_k$.

Іншими словами, принцип взаємності говорить: якщо ЕРС E , діючи в деякій гілці схеми, що не містить інших джерел, викликає в іншій гілці струм I , то принесена в цю гілку ЕРС E викличе в першій гілці такий же струм.

Методом еквівалентного генератора користуються, якщо необхідно обчислити струм в якій-небудь одній гілці, а інші гілки нас не цікавлять. Тоді схема представляється у вигляді гілки приєднаної до активного двухполосника, яким замінюється інша частина схеми (рис.4.1 а). Параметри активного двухполосника $R_{\text{екв}}$, $E_{\text{екв}}$ (рис.4.1 б). обчислюються наступним чином. Подумки розмикаємо гілку з шуканим струмом i , розв'язуючи задачу для розімкненого кола, знаходимо напругу холостого ходу на розімкнутих затискачах. Напруга холостого ходу дорівнюватиме еквівалентній ЕРС.

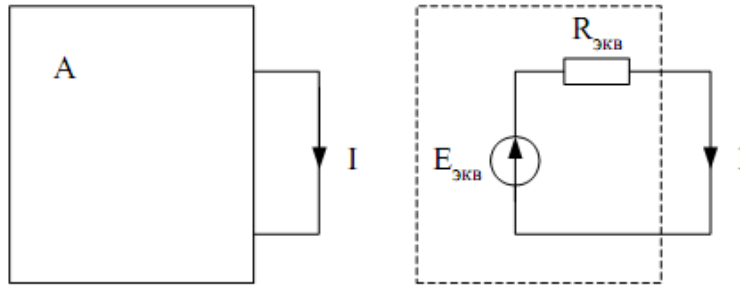


Рисунок 4.1

Щоб знайти $R_{\text{екв}}$ потрібно замкнути джерела ЕРС і розімкнути джерела струму у всій схемі і знайти еквівалентний опір щодо розімкнутих затискачів. Схема заміщення з параметрами еквівалентна вихідній. Тому можна знайти струм в потрібній нам гілці, як

$$I = \frac{E_{\text{екв}}}{R_{\text{екв}}}$$

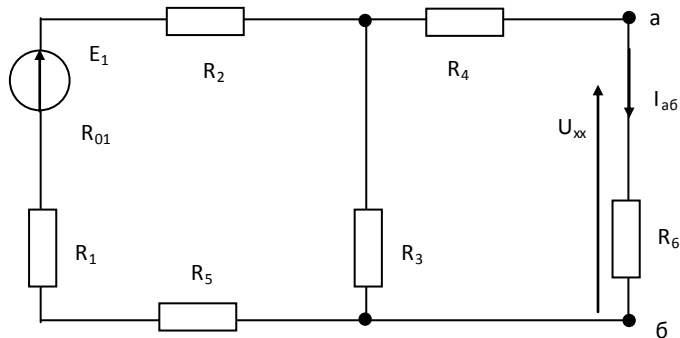
Приклади розв'язання задач

Задача 4.1. Визначити струм у вітці з опором R_6 у схемі, приведеній на малюнку методом еквівалентного генератора.

Електрична схема кола.

Вихідні дані:

- $E = 100 \text{ В};$
- $R_1 = 4 \text{ Ом};$
- $R_2 = 5 \text{ Ом};$
- $R_3 = 10 \text{ Ом};$
- $R_4 = 10 \text{ Ом};$
- $R_5 = 20 \text{ Ом};$
- $R_6 = 2,5 \text{ Ом}.$



Розв'язування: Визначаємо еквівалентний вхідний опір схеми відносно затискачів а б:

$$R_{ек} = R_4 + \frac{R_3(R_{01} + R_1 + R_2 + R_5)}{R_3 + R_{01} + R_1 + R_2 + R_5} = 10 + \frac{10(1+4+5+20)}{10+1+4+5+20} = 17.5 \text{ Ом.}$$

Визначаємо еквівалентну ЕРС схеми відносно затискачів аб, яка рівна напрузі холостого ходу між даними вузлами:

$$E_{ек} = U_{xx} = U_3 = \frac{E_1 R_3}{R_{01} + R_1 + R_2 + R_3 + R_5} = \frac{100 \cdot 10}{1+4+5+10+20} = 25 \text{ В.}$$

Визначаємо струм у шуканій вітці:

$$I_{аб} = \frac{E_{ек}}{R_{ек} + R_6} = \frac{25}{17.5 + 2.5} = 1.25 \text{ А.}$$

Задача 4.2. В схемі, зображеній на рис. 3.1 методом еквівалентного генератора знайти струм в першій гілці I_1 . Параметри кола такі ж, як і в задачі 3.1.

Розв'язування. Розімкнемо першу гілку. Знайдемо напругу холостого ходу (рис. 4.3). Напруга холостого ходу можна знайти, з другого закону Кірхгофа для контура, відзначеного пунктиром на рис. 4.3.

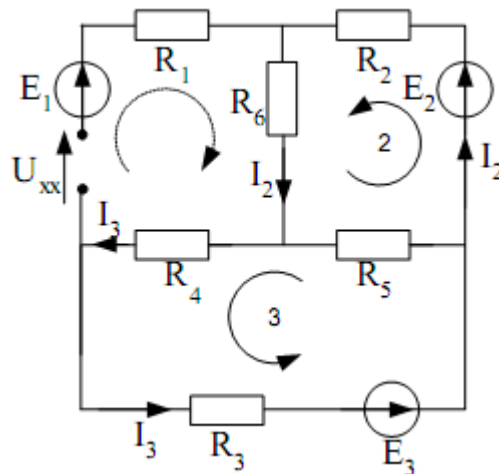


Рисунок 4.3

Отримаємо:

$$U_{xx} = E_1 - I_2 R_6 - I_3 R_4.$$

(4.6)

Знайдемо струми I_2 і I_3 . В схемі з розімкненою першою гілкою вони будуть співпадати з струмами I_6 і I_4 . Схема з розімкненої першої гілки матиме два незалежні контури, отже система рівнянь для знаходження контурних струмів буде мати другий порядок.

Отримаємо дану систему:

$$I_2(R_6 + R_2 + R_5) - I_3R_5 = E_2;$$

$$-I_3R_5 + I_3(R_4 + R_3 + R_5) = E_3$$

Підставляючи числа, запишемо в матричному вигляді.

$$\begin{pmatrix} 105 & -70 \\ -70 & 115 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Отримаємо значення струмів для розімкненої схеми $I_2 = 0,449$ А і $I_3 = 0,317$ А. Потім знайдемо напругу холостого ходу, підставивши ці значення в (4.6).

$$U_{xx} = E_1 - I_2R_6 - I_3R_4 = 0,993 \text{ В.}$$

Обчислимо тепер $\square_{\text{екв}}$ із схеми, показаної на рис. 4.4 а).

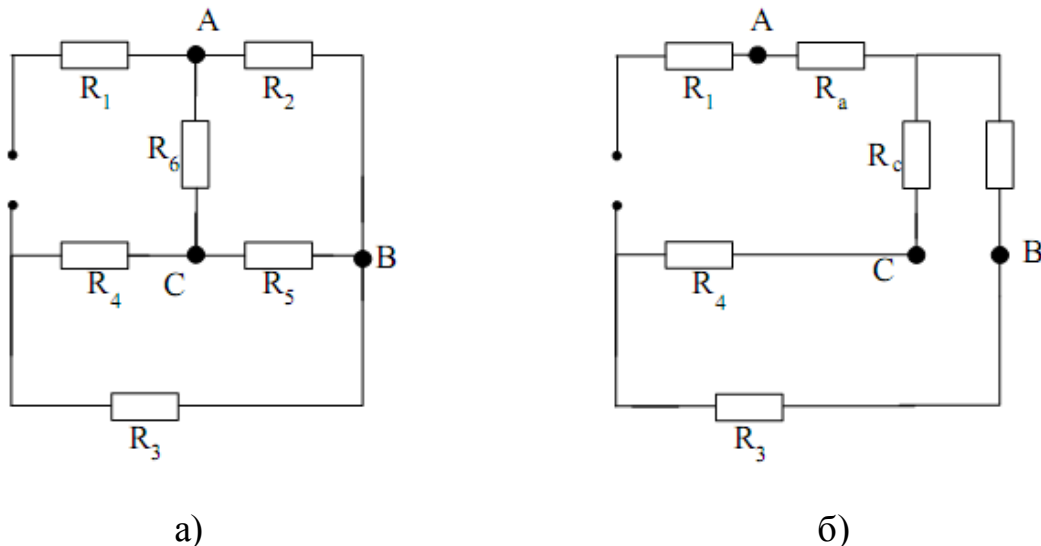


Рисунок 4.4

Схема, показана на рис 4.4 а) не може бути зведена до комбінації паралельних і послідовних з'єднань. Тому для обчислення еквівалентного опору необхідно перетворити трикутник, який утворюють опір між точками А, В і С в зірку (рис. 4.4б). Скористаємося формулами (2.5). при цьому врахуємо, що $R_A = R_5$, $R_B = R_6$, $R_C = R_2$.

$$R_a = \frac{R_6 R_2}{R_5 + R_6 + R_2} = 2,38(\text{Ом})$$

$$R_b = \frac{R_2 R_5}{R_5 + R_6 + R_2} = 16,7(\text{Ом})$$

$$R_c = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6 + R_2} = 6,67(\text{Ом})$$

Тепер параметри схеми (рис.4,4 б) відомі, і можна обчислити $R_{\text{екв}}$:

$$R_{\text{екв}} = R_{1+A} + \frac{(R_C + R_4)(R_B + R_3)}{R_C + R_4 + R_B + R_3} = 59,4(\text{Ом})$$

Знаходимо струм I_1 :

$$I_1 = \frac{E_{\text{екв}}}{R_{\text{екв}}} = 0,017 \text{ А}$$

Розв'язання задач

- Для схеми (рис. 4.5) визначити струм методом еквівалентного генератора, якщо $E_1 = 60 \text{ В}$; $E_2 = 20 \text{ В}$; $E_3 = 120 \text{ В}$; $r_1 = r_2 = r_4 = 20 \text{ Ом}$; $r_3 = r_6 = 10 \text{ Ом}$; $r_5 = 10 \text{ Ом}$.

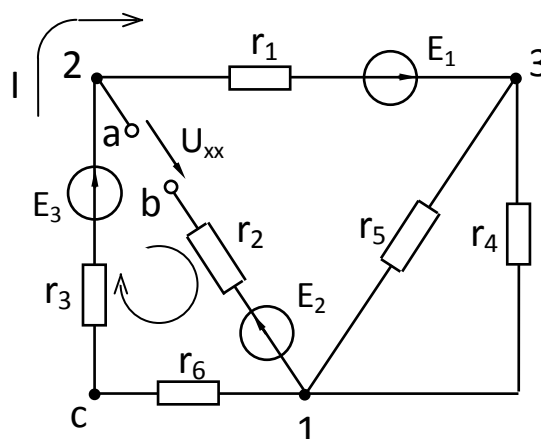
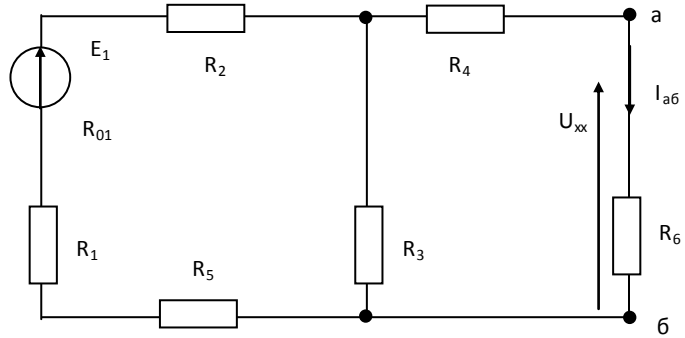


Рисунок 4.5

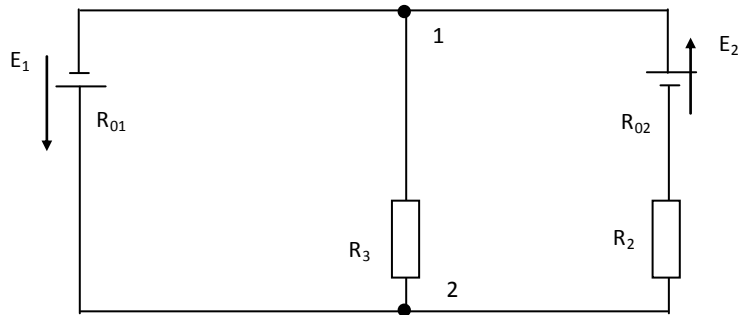
- Визначити струм у вітці з опором R_6 у схемі, приведений на рисунку методом еквівалентного генератора.
Вихідні дані: $E=100 \text{ В}$;
 $R_1=4 \text{ Ом}$; $R_2=5 \text{ Ом}$;

$$R_3=10 \text{ Ом}; R_4=10 \text{ Ом}; \\ R_5=20 \text{ Ом}; R_6=2,5 \text{ Ом}.$$



3. Розрахувати струми у вітках схеми електричного кола методом накладання струмів. Скласти рівняння балансу потужностей.

Вихідні дані:
 $E_1=60 \text{ В};$
 $E_2=100 \text{ В};$
 $R_{01}=R_{02}=1 \text{ Ом};$
 $R_2=5 \text{ Ом};$
 $R_3=4 \text{ Ом}.$



Питання для самоконтролю

1. Принцип та метод накладання. Порядок розрахунку методом накладання.
2. Двополюсник: активний і пасивний. Теорема Тевенена про еквівалентний генератор. Заміна активного двополюсника еквівалентним генератором. Метод еквівалентного генератора.
3. Передача енергії постійного струму від активного двополюсника до навантаження. Узгодження навантаження.
4. Передача енергії постійного струму від активного двополюсника до навантаження. Передача енергії постійного струму по лініях передачі.
5. Дайте порівняльну характеристику методів розрахунку електричних кіл постійного струму.

Задачі для самостійного розв'язання

Для електричного кола, у відповідності з номером варіанта, що зображений в таблиці розрахувати струм в будь-якій гілці, що містить джерело ЕРС методом еквівалентного генератора.

варіант	рис.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	E1	E2	E3
1	4.6	4	7	10	12	20	5.5	15	20	10
2	4.7	9	20	16	40	30	22	10	30	40

3	4.8	13	5	9	7	10	4	15	10	21
4	4.9	4	8	6	10	13	10	12	30	9
5	4.10	10	18	5	10	8	6	10	20	30
6	4.11	30	40	22	10	14	50	15	23	9.5

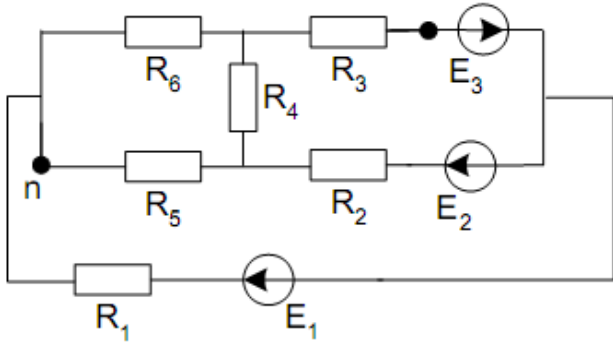


Рисунок 4.6

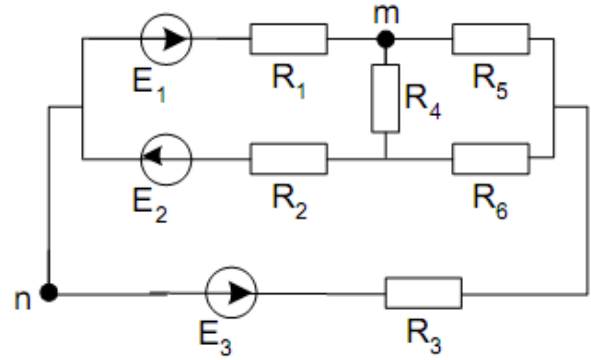


Рисунок 4.7

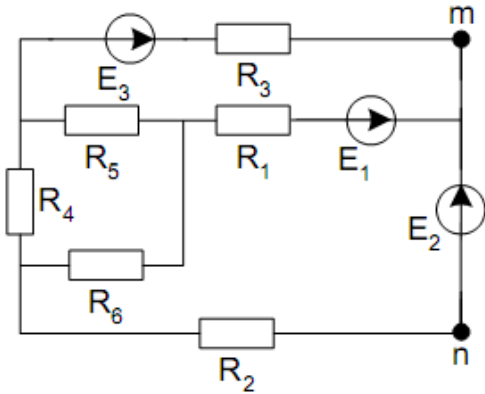


Рисунок 4.8

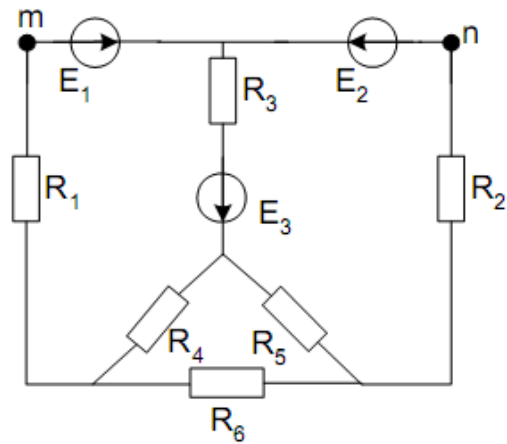


Рисунок 4.9

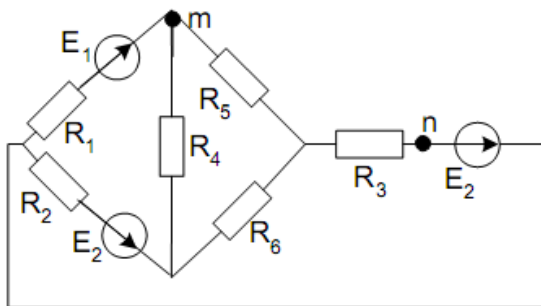


Рисунок 4.10

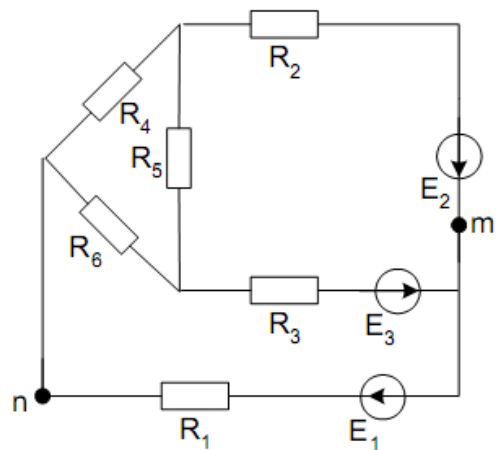


Рисунок 4.10

Тема 5. Графо-аналітичний метод розрахунку нелінійних електричних ланцюгів.

Мета: Навчитись виконувати розрахунок нелінійних електричних кіл постійного струму.

План

1. Повторення матеріалу за темою: "Нелінійні електричні кола постійного струму". Вольт-амперні характеристики.
2. Графічні розрахунки кіл з послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів.
3. Метод двох вузлів.

Основні терміни та поняття: нелінійне електричне коло, постійний струм, ВАХ, напруга, гілка, вузол.

Методичні рекомендації

Багато які нелінійні елементи, що застосовуються на практиці, мають вольт-амперні характеристики, в яких немає лінійних ділянок і рівнянь для аналітичного вираження їх.

Розрахунок кіл, що містять такі елементи, здійснюють графічними методами.

Початкові дані для розрахунку (ВАХ кола) задають у вигляді графіків або таблиць.

Визначити струм одного елемента за напругою цього елемента, або розв'язати обернену задачу досить просто: задану величину відкладають на осі координат, знаходять відповідну їй точку кривої, а потім на іншій осі визначають шукану величину.

Розглянемо, як розв'язують такі задачі, коли кілька елементів з'єднано між собою в нелінійному колі.

Послідовне з'єднання двох нелінійних елементів.

Для розрахунку такого кола (рис. 5.1а) задані ВАХ елементів $I(U_1)$ та $I(U_2)$ будують в загальній системі координат (рис. 5.1б).

Далі будують ВАХ $I(U)$ всього кола, яка виражає залежність струму в колі від загальної напруги.

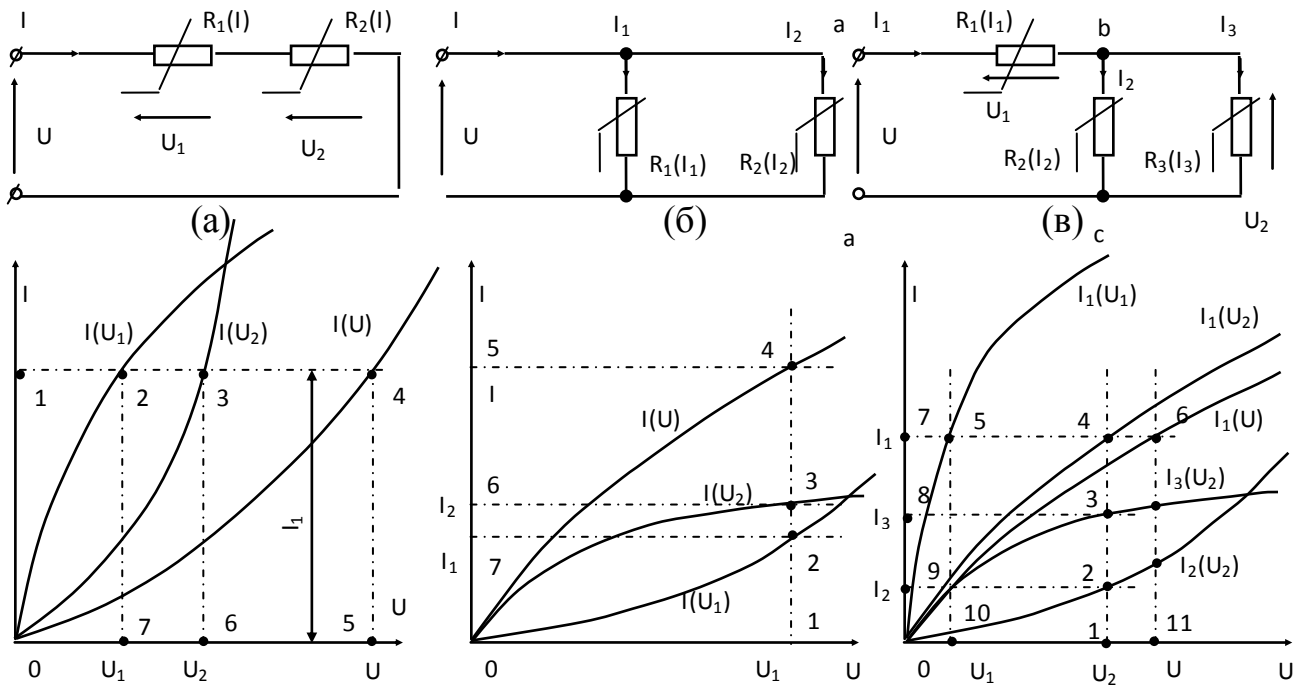


Рисунок 5.1. Розрахунок нелінійних кіл при послідовному (а), паралельному (б) та змішаному (в) з'єднанні елементів.

Струм I обох ділянок кола однаковий, а загальна напруга $U = U_1 + U_2$.

Для побудови загальної ВАХ досить додати абсциси початкових кривих $I(U_1)$ та $I(U_2)$.

Проведемо пряму, паралельну осі абсцис, яка відповідає струму I_1 . Відрізки 1-2 і 1-3 у вибраному масштабі виражають напругу U_1 , U_2 на ділянках. Додавши ці відрізки, на тій самій прямій дістанемо точку 4 загальної ВАХ.

Для інших значень струму аналогічно знайдемо ще ряд точок, через які проведено загальну ВАХ.

Побудова ВАХ (рис. 5.1а) є підготовчим етапом для розв'язання різних задач, що стосуються подібних кіл.

Треба, наприклад, визначити струм у колі та напруги U_1 і U_2 на ділянках, якщо загальну напругу U відомо.

На осі абсцис знаходимо точку 5, яка визначає напругу U (відрізок 0-5 в масштабі напруг виражає напругу в колі). Через неї проводимо перпендикуляр до осі абсцис до перетину із заголеною ВАХ $I(U)$ в точці 4. Із точки 4 проводимо лінію, паралельну осі абсцис. Відрізок 5-4 виражає струм у колі, а відрізки 1-2 і 1-3 — напруги на ділянках U_1 і U_2 .

Паралельне з'єднання двох нелінійних елементів.

При паралельному з'єднанні двох нелінійних елементів (5.1б) до них прикладено ту саму напругу U , а струм у нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у вітках: $I = I_1 + I_2$

Для побудови загальної $I(U)$ треба для ряду значень U додати ординати ВАХ елементів як показано на (рис. 5.1б). При напрузі U_1 (відрізок 0-1) сума відрізків 1-2 (струм I_1) та 1-3 (струм I_2) дорівнює відрізку 1-4 (струм I).

Припустимо, що за заданим значенням $U = U_1$ треба визначити струми у вітках і загальний струм I . На осі абсцис відкладаємо відрізок 0-1, який виражає напругу U_1 , і через точку 1 проводимо лінію, паралельну осі ординат. Визначаємо точки 2, 3, 4 перетину прямої з ВАХ. Відрізки 1-2, 1-3, 1-4 в масштабі струмів виражають струми в колі, відповідно I_1, I_2, I .

Змішане з'єднання нелінійних елементів.

При змішаному з'єднанні нелінійних елементів графічний розрахунок кола виконують методом “згортання” схеми: згідно із схемою з'єднання додають інші ВАХ.

Розглянемо розв'язання цієї задачі щодо схеми (рис. 5.1в).

За заданими ВАХ $I_2(U_2), I_3(U_3)$ паралельно з'єднаних елементів будуюмо ВАХ ділянки кола між точками b, c.

Далі будуюмо ВАХ $I_1(U)$ всього кола, враховуючи, що ділянку кола між точками b, c ввімкнено послідовно з нелінійним елементом на ділянці a-b.

Нехай задано напругу прикладену до кола U , необхідно визначити струми в схемі та напруги на ділянках кола.

Відклавши на осі абсцис відрізок 0-11, який виражає напругу U , проведемо лінію паралельно осі ординат 11-6 до перетину з кривою $I_1(U)$.

Відрізком 11-6 визначається струм I_1 в нерозгалуженій частині кола. Пряма, паралельна осі абсцис, проведена через точку 6, перетинає криві $I_1(U_1)$ та $I_1(U_2)$ в точках 5 і 4. Відрізками 7-4 і 7-5 визначаються напруги U_2 і U_1 на ділянках. Напруга U_2 — загальна для паралельно з'єднаних ділянок зі струмами I_2 та I_3 . Щоб визначити ці струми, через точку 4 проводимо пряму, паралельно осі

ординат. Перетин цієї прямої з кривими $I_1(U_2)$ та $I_3(U_2)$ в точках 2 і 3 дає відрізки 1-2, 1-3, які визначають струми I_2 та I_3 .

Розв'язання задач

1. Розрахувати струми і напруги на елементах нелінійного кола, приведенного на рисунку 5.2. Задані вольтамперні характеристики нелінійних елементів та напруга прикладена до кола $U=80$ В.

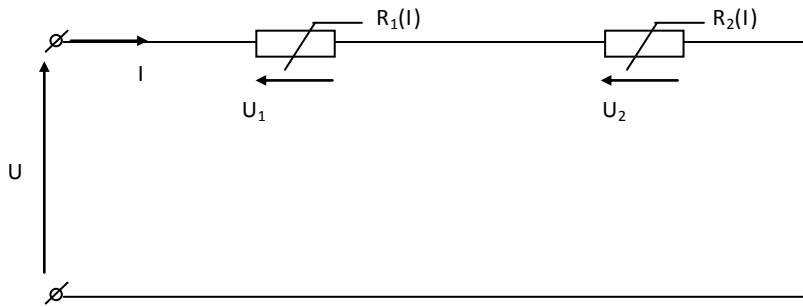


Рисунок 5.2

Розв'язання:

1. Будуємо вольтамперні характеристики нелінійних елементів в загальній системі координат.

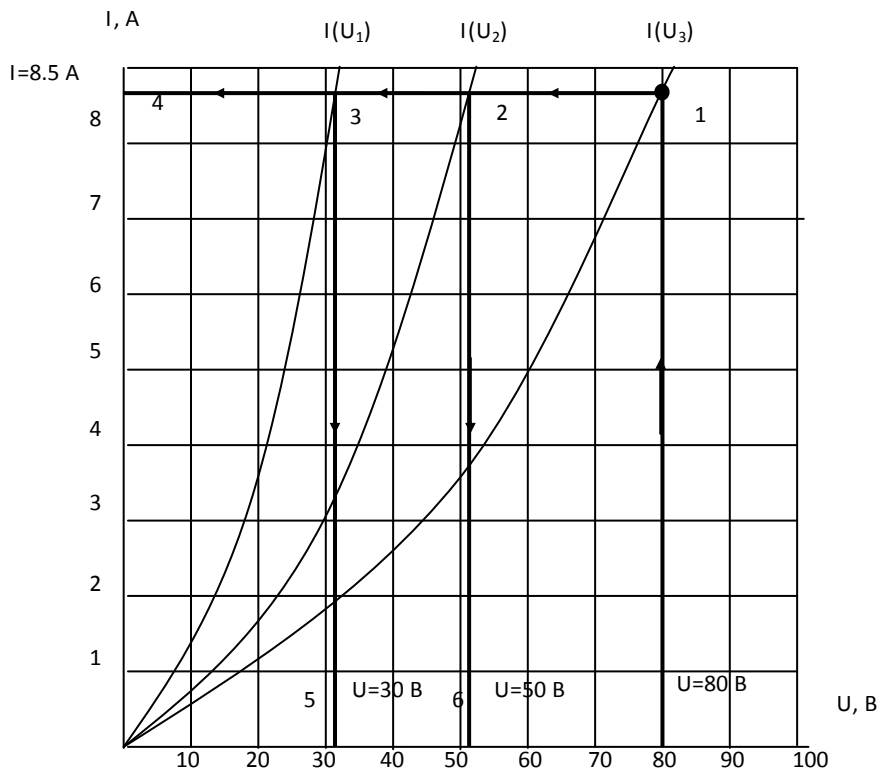


Рисунок 5.3

Струм яких проходить по нелінійних елементах один і той же, напруга прикладена до кола, за другим законом Кірхгофа:

$$U=U_1 +U_2$$

Будуємо результуючу ВАХ кола I (U), додаючи абсциси ВАХ окремих нелінійних елементів.

Відкладаємо на осі абсцис напругу $U= 80$ В прикладену до кола і проектуємо її на результуючу ВАХ кола, точка перетину з якою (1) проектуємо на вісь ординат.

Дана лінія перетинає ВАХ нелінійних елементів в точках 2, 3 і вісь ординат в точці 4. В результаті отримуємо струм у колі $I=8,5$ А (точка 4).

Точки 2, 3 проектуємо на вісь абсцис і отримуємо напруги на елементах кола:

$$U_1=30 \text{ В (точка 5)}$$

$$U_2=50 \text{ В (точка 6)}$$

2.Розрахувати струми і напруги на елементах нелінійного кола приведеного на малюнку. Задані вольтамперні характеристики нелінійних елементів та напруга прикладена до кола $U=70$ В.

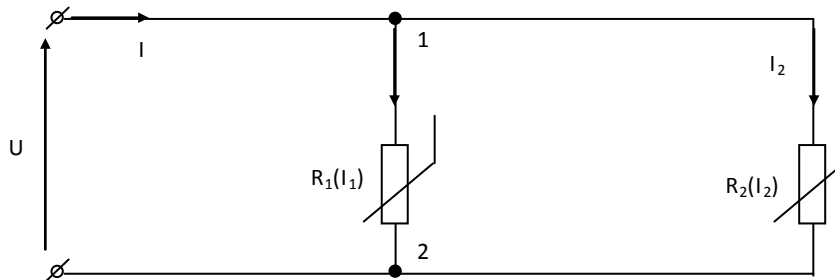


Рисунок 5.4

Рішення: Будуємо ВАХ нелінійних елементів в загальній системі координат.

2. Напруга, яка прикладена до кола, прикладена також до нелінійних елементів і рівна $U=70$ В.

Струми у вітках: $I=I_1+I_2$ за першим законом Кірхгофа. Будуємо результуючу ВАХ нелінійних елементів кола.

1. Відкладаємо на осі абсцис прикладену напругу до кола $U=70$ В. Проектуємо її на результуючу ВАХ кола. Отримаємо точки перетину з ВАХ 1, 2, 3, які проектуємо на вісь ординат і отримуємо струми у вітках схеми.

$$I=5,7 \text{ А; (Точка 6 на ВАХ)}$$

$$I_1=4,6 \text{ А; (Точка 5 на ВАХ)}$$

$$I_2=1,1 \text{ А; (Точка 4 на ВАХ).}$$

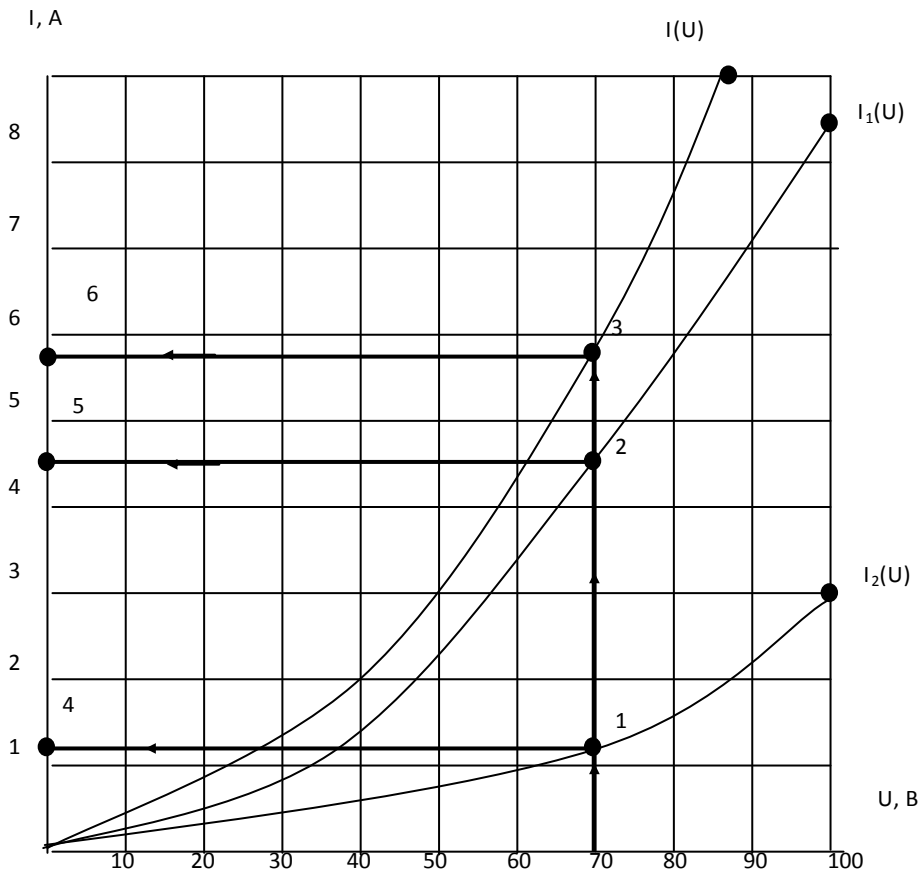


Рисунок 5.5

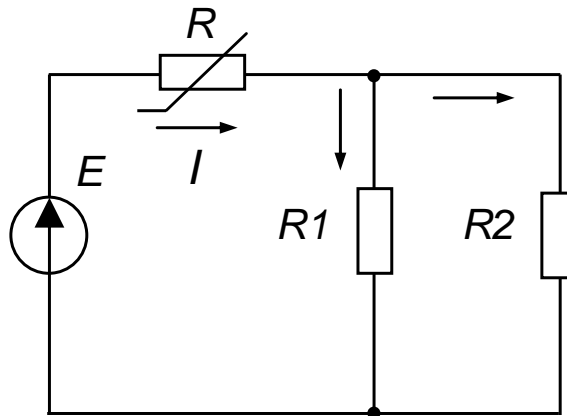
Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення нелінійного елемента
2. Що розуміють під статичним і диференціальним опором
3. У чому суть графічного методу розрахунку нелінійних ланцюгів
4. Розрахунок нелінійного кола з двома вузлами.
5. Заміна нелінійного елемента лінійним опором і ЕРС.
6. Практичне застосування нелінійних елементів постійного струму.
7. Основні поняття та закони магнітних кіл. Закони повного струму та закони Кірхгофа для магнітних кіл. Формальна аналогія між магнітними й електричними колами.

Задачі для самостійного розв'язання

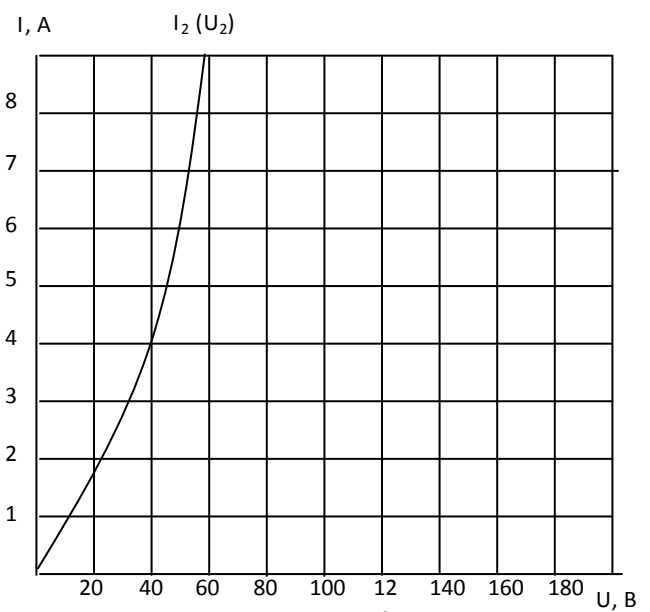
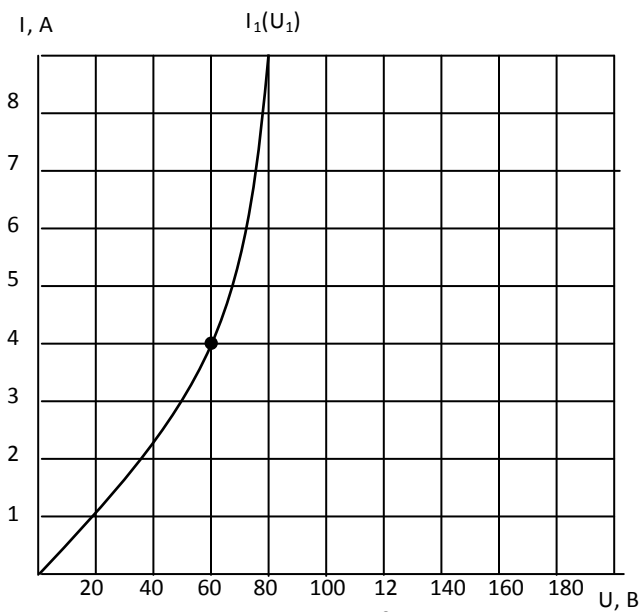
1. Визначити струм I через нелінійний елемент, якщо $E = 36$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 9$ Ом. Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента задана у вигляді таблиці.

$I, \text{ A}$	0	2	4	6	8	10
$U, \text{ B}$	0	4	9	15	23	35



2. Розрахувати струми та напруги на елементах нелінійного кола приведенного на малюнку. Задані ВАХ нелінійних елементів та напруга прикладена до кола, $U = 120$ В.

Вольтамперні характеристики нелінійних елементів.



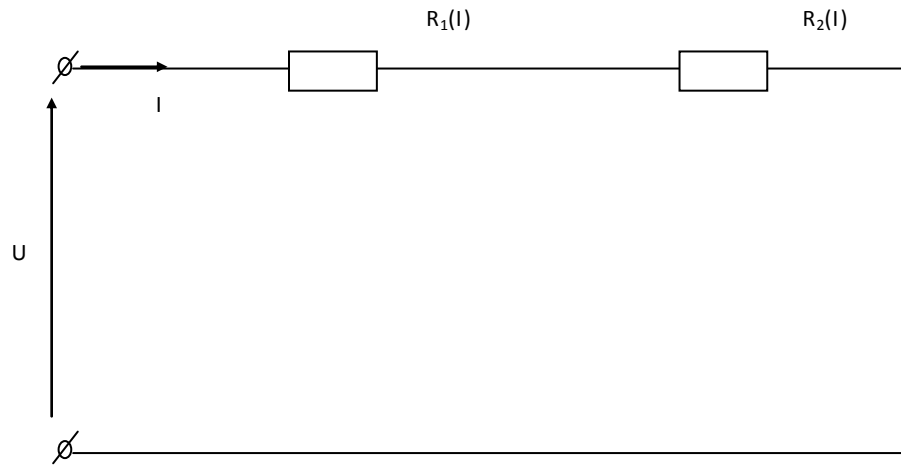


Рисунок 5.6 Електрична схема нелінійного кола

Тема 6. Комплексний метод розрахунку ланцюгів синусоїдального струму з послідовним і паралельним з'єднанням R,L,C.

Мета: засвоїти основні величини й закони, що характеризують синусоїдний струм і коло синусоїдного струму та методи розрахунку кіл синусоїдного струму.

План

1. Елементи кіл синусоїдного струму та методи розрахунку складних кіл.
2. Зображення синусоїдних величин обертовими векторами та комплексними величинами.
3. Резонансні явища в колах синусоїдного струму.
4. Індуктивно зв'язані електричні кола..

Основні терміни і поняття: Основні поняття та визначення синусоїдних електричних величин(ЕРС, напруги, струму), амплітуда, частота, період, фаза, початкова фаза, зсув фаз. Діюче та середнє значення.

Методичні рекомендації

Розрахунок кіл синусоїдного змінного струму краще все проводити символічним методом. Застосування цього методу пов'язане з заміною синусоїдних функцій часу комплексними числами:

$$e = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \rightarrow \underline{E}_m = E_m \cdot e^{j\psi} ;$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta) \rightarrow \underline{U}_m = U_m \cdot e^{j\beta} ;$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \rightarrow \underline{I}_m = I_m \cdot e^{j\alpha} .$$

Величини $\underline{E}_m, \underline{U}_m, \underline{I}_m$ називають комплексними амплітудами. При розрахунках часто використовують комплексні діючі значення

$$\underline{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi} ; \quad \underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\beta} ; \quad \underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\alpha} .$$

Застосування комплексних чисел дозволяє застосовувати закони Ома та Кірхгофа у символічній формі:

$$\underline{U} = \underline{z} \cdot \underline{I}; \quad \sum \underline{E} = \sum \underline{z} \cdot \underline{I}; \quad \sum \underline{I} = 0,$$

де $z = r + j \cdot x$ - повний комплексний опір ділянки кола;

r - активний опір цієї ділянки;

x - реактивний опір.

В зв'язку з цим електричні кола в комплексній формі можна розраховувати будь-яким з методів, що застосовуються для розрахунку кіл постійного струму.

Наприклад, задане електричне коло, що складається із трьох гілок, з'єднаних двома вузлами:

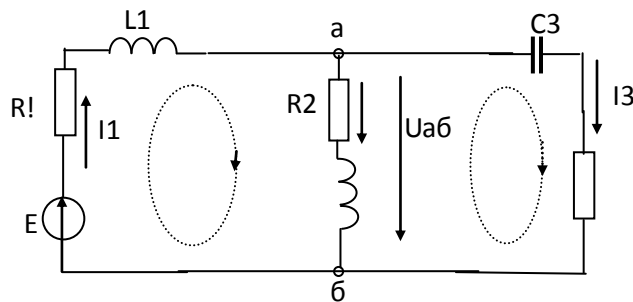


Рисунок.6.1

Отже, система рівнянь, складених за законами Кірхгофа, повинна містити три рівняння, з них одне - I за законом, і два - по II закону.

Для заданої схеми, з урахуванням обраних напрямків струмів у гілках і напрямків обходу контурів, ці рівняння мають вигляд:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 & \text{- для вузла «а»} \\ i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = e & \text{- для першого контуру} \\ - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_3} \int i_3 dt + L_3 \frac{di_3}{dt} = 0 & \text{- для другого контуру} \end{cases}$$

Для цієї ж схеми складемо рівняння в символічній формі:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0 \\ \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 X_{L1} + \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 X_{L2} = \dot{E} \\ -\dot{I}_2 R_2 - \dot{I}_2 X_{L2} + \dot{I}_3 X_{C3} + \dot{I}_3 X_{L3} = 0 \end{cases}$$

Тут X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} , X_{C3} - комплексні реактивні опори.

Розрахувати струми в гілках можна тими ж способами, які застосовувалися при розрахунках кіл постійного струму.

Якщо застосувати метод *контурних струмів*, то для заданого кола треба скласти систему із двох рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{I}_{к1} Z_{11} - \dot{I}_{к2} Z_{12} = \dot{E} \\ -\dot{I}_{к1} Z_{21} + \dot{I}_{к2} Z_{22} = 0 \end{cases}$$

де $Z_{11} = (R_1 + R_2) + j(x_1 + x_2)$ - повний комплексний опір I контуру

$Z_{12} = Z_{21} = R_2 + jX_{L2}$ - повний комплексний опір гілки, загальної для обох контурів

$Z_{22} = (R_2 + R_3) + j(x_2 + x_3 - x_3)$ - повний комплексний опір II контуру

Вирішивши систему, знайдемо контурні струми $\dot{I}_{к1}$ і $\dot{I}_{к2}$, після чого визначимо шукані струми в гілках:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{к1}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{к1} - \dot{I}_{к2}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{к2}$$

При розрахунку методом *двох вузлів* спочатку визначається напруга між вузлами «а» і «б», а потім за законом Ома - струми в гілках.

Напруга між вузлами $U_{ab} = \frac{Ey_1}{y_1 + y_2 + y_3}$

Де y_1, y_2, y_3 - повні комплексні провідності гілок

$$y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1 + jx_{L1}} ; \quad y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2 + jx_{L2}} ; \quad y_3 = \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_3 + j(x_{L3} - x_{C3})} ;$$

Струми в гілках: $I_1 = \frac{-\dot{U}_{ab} + \dot{E}}{Z_1} = (-\dot{U}_{ab} + \dot{E})y_1 ;$

$$I_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_2} = \dot{U}_{ab} y_2 ;$$

$$I_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_3} = \dot{U}_{ab} y_3$$

Розв'язання задач

1. Для заданого електричного кола (рис. 6.2) визначити комплекси діючих значень струмів у всіх гілках, скориставшись одним з методів розрахунку лінійних електричних кіл.

Вихідні дані:

$L_2 = 127,6 \text{ мГн}; C_1 = 106 \text{ мкФ}; C_2 = 159 \text{ мкФ}; R_3 = 100 \text{ Ом};$

$f = 50 \text{ Гц}; e_1' = 99 \sin(\omega t + 340^\circ) \text{ В}; e_2'' = 179 \cos(\omega t - 90^\circ) \text{ В}$

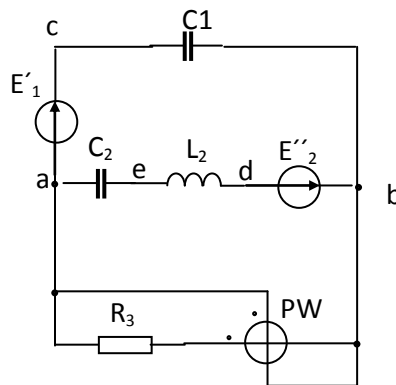


Рисунок 6.2

Розв'язування. Тому що у завданні потрібно визначити комплекси струмів у гілках, то розрахунок будемо робити в символічній формі.

$$1. \text{Кутова частота } \omega = 2\pi f = 2 * 3,14 * 50 = 314 \text{ c}^{-1}$$

2. Комплексні реактивні опори гілок

$$X_{C1} = -j \frac{1}{\omega C_1} = -j \frac{1}{314 * 106 * 10^{-6}} = -j30 = 30 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = -j \frac{1}{\omega C_2} = -j \frac{1}{314 * 159 * 10^{-6}} = -j20 = 20 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

$$X_{L2} = j \omega L = j314 * 127 * 10^{-3} = j40 = 40 e^{j90^\circ} \text{ Ом}$$

Повні комплексні опори гілок

$$Z_1 = X_{C1} = -j30 = 30 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

$$Z_2 = X_{L2} + X_{C2} = j \omega L - j \frac{1}{\omega C_2} = j(40-20) = j20 = 20 e^{j90^\circ} \text{ Ом}$$

$$Z_3 = R_3 = 10 \text{ Ом}$$

Знайдемо комплекси діючих значень ЕРС:

$$e_1' = 99 \sin(\omega t + 340^\circ) = 99 \sin(\omega t - 20^\circ) \text{ В - миттєве значення ЕРС}$$

$$\text{діюче значення цієї ЕРС} \quad E_1' = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{99}{\sqrt{2}} = 70 \text{ В}$$

$$\text{комплексне діюче значення} \quad \dot{E}_1' = 70 e^{j340^\circ} = 70 e^{-j20^\circ} = 65,8 - j24 \text{ В}$$

$$e_2'' = 179 \cos(\omega t - 90^\circ) = 179 \sin(\omega t - 90^\circ + 90^\circ) = 179 \sin \omega t \text{ В - миттєве значення ЕРС}$$

діюче значення цієї ЕРС $E_2'' = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{179}{\sqrt{2}} = 126,6 \text{ В}$

комплексне діюче значення $\dot{E}_2'' = 126,6e^{j0^\circ} = 126,6$

Розрахунок струмів у гілках

a) Метод контурних струмів

Задавшись напрямками струмів у гілках і напрямками обходу контурів, складемо рівняння по II закону Кірхгофа.

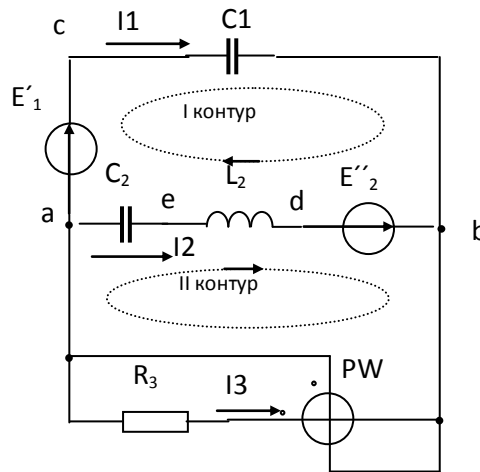


Рисунок 6.2

$$\begin{cases} I_{k1} Z_{11} - I_{k2} Z_{12} = \dot{E}'_1 - \dot{E}''_2 \\ -I_{k1} Z_{21} + I_{k2} Z_{22} = \dot{E}''_2 \end{cases}$$

де $Z_{11} = X_{C1} + X_{C2} + X_{L2} = -j30 - j20 + j40 = -j10 = 10e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$

$Z_{22} = R_3 + X_{C2} + X_{L2} = 10 - j20 + j40 = 10 + j40 = 22,36e^{j63,4^\circ} \text{ Ом}$

$Z_{12} = Z_{21} = X_{C2} + X_{L2} = -j20 + j40 = j20 = 20e^{j90^\circ}$

Підставляємо числові коефіцієнти, одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} i_{k1}(-j10) - i_{k2}(j20) = 65,8 - j24 - 126,6 \\ -i_{k1}(j20) + i_{k2}(10 + j20) = 126,6 \end{cases}$$

У результаті рішення системи отримана відповідь:

$$i_{k1} = -0,486 + j1,7 \text{ А}$$

$$i_{k2} = 1,44 - j3,85 \text{ А}$$

Струми в гілках:

$$i_1 = i_{k1} = -0,486 + j1,7 = 1,768e^{j106^\circ} \text{ А}$$

$$i_2 = i_{k2} - i_{k1} = 1,44 - j3,85 - (-0,486 + j1,7) = 1,916 - j5,55 = 5,87e^{-j71^\circ} \text{ А}$$

$$i_3 = -i_{k2} = -1,44 + j3,85 = 4,1e^{j111^\circ} \text{ А}$$

Для перевірки підставимо отримані відповіді в рівняння по І закону Кірхгофа

$$i_1 + i_2 + i_3 = (-0,486 + j1,7) + (1,916 - j5,55) + (-1,44 + j3,85) = 0$$

б) Метод двох вузлів

Напруга між вузлами «а» і «б»

$$U_{ab} = \frac{-\dot{E}'_1 y_1 - \dot{E}''_2 y_2}{y_1 + y_2 + y_3}$$

$$\text{де } y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{X_{c1}} = \frac{1}{-j30} = j0,033 \text{ См}$$

$$y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{X_{L2} + X_{c2}} = \frac{1}{j40 - j20} = \frac{1}{j20} = -j0,05 \text{ См}$$

$$y_3 = \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ Сим}$$

Знаки «-» у чисельнику означають, що ЕРС джерел спрямовані від вузла «а».

$$\dot{U}_{ab} = \frac{-(65,8 - j24)j0,033 - 126,6(-j0,05)}{j0,033 - j0,05 + 0,1} = -14,5 + j38,75 \text{ В}$$

Струми в гілках

$$\dot{I}_1 = (\dot{U}_{ab} + \dot{E}'_1) y_1 = (-14,5 + j38,75 + 65,8 - j24) j 0,033 = -0,487 + j1,7 \text{ А}$$

$$\dot{I}_2 = (\dot{U}_{ab} + \dot{E}''_2) y_2 = (-14,5 + j38,75 - 126,6)(-j0,05) = 1,937 - j 5,575 \text{ А}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_{ab} y_3 = (-14,5 + j38,75) 0,1 = -1,45 + j3,876 \text{ А}$$

Покази ватметра.

У заданій схемі ватметр включений у третю гілку – його котушка напруги включена на напругу \dot{U}_{ab} , а по струмовій котушці протікає струм \dot{I}_3 .

Так як ватметр вимірює активну потужність, то завдання зводиться до визначення активної потужності ділянки.

а) для визначення показань ватметра першим способом, необхідно обчислити повну комплексну потужність ділянки

$$\tilde{S} = \dot{U}_{ab} * \dot{I}_3^* = (-14,5 + j38,75) * (-1,45 - j3,876) = 170 + j0 \text{ ВА}$$

де \dot{I}_3^* - сполучений комплекс струму \dot{I}_3 . Відрізняється від комплексу \dot{I}_3 знаком перед мнимою частиною.

Дійсна частина повної комплексної потужності - це активна потужність:

$$P = \operatorname{Re}(\tilde{S}) = 170 \text{ Вт}$$

б) активна потужність кола визначається також за формулою

$$P = U_{ab} I_3 \cos \varphi$$

де U_{ab} - діюче значення напруги, I_3 - діюче значення струму, φ - кут фазового зсуву між напругою й струмом.

$$U_{ab} = \sqrt{14,5^2 + 38,75^2} = 41,4 \text{ В} \quad \Psi_U = \arctg \frac{38,75}{14,5} = -69,5^\circ$$

$$I_3 = \sqrt{1,45^2 + 3,876^2} = 4,11 \text{ А} \quad \Psi_I = \arctg \frac{3,876}{1,45} = -69,5^\circ$$

$$\varphi = \Psi_U - \Psi_I = -69,5^\circ - (-69,5^\circ) = 0$$

Таким чином покази ватметра:

$$P = U_{ab} I_3 \cos \varphi = 41,4 * 4,11 * \cos 0 = 170 \text{ Вт}$$

Розрахунок і побудова топографічної діаграми

Для побудови топографічної діаграми вибирається один з контурів електричного кола, одна крапка контуру заземлюється, і розраховуються потенціали інших крапок у порядку їхнього розташування в контурі.

Побудуємо топографічну діаграму для I контуру.

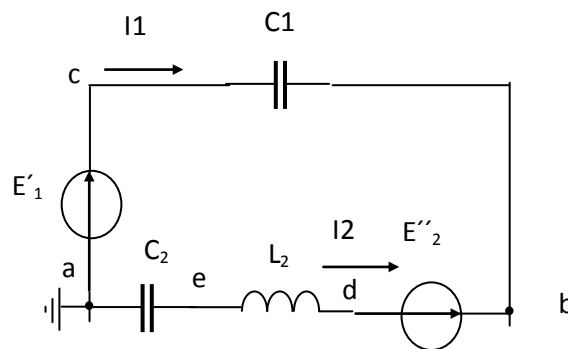


Рисунок 6.3

Для побудови топографічної діаграми обраного контуру (рис.6.3) необхідно розрахувати потенціали точок a,c,b,d,e.

Так як точка «а» заземлена, її потенціал дорівнює нулю:

$$\varphi_a = 0$$

$$\varphi_c = \varphi_a + E'_1 = 0 + 65,8 - j24 = 65,8 - j24 \text{ В}$$

$$\varphi_b = \varphi_c - \dot{U}_{C1} = \varphi_b - I_1 X_{C1} = 65,8 - 8 - j24 - (-0,487 + j1,7)(-j30) = 15 - j38,6 \text{ В}$$

$$\varphi_d = \varphi_b - \dot{E}_2'' = 15 - j 38,6 - 126,6 = -111 - j 38,6 \text{ В}$$

$$\varphi_e = \varphi_d + \dot{U}_{L2} = \varphi_d + \dot{I}_2 X_{L2} = -111 - j 38,6 + (1,937 - j 5,575) j 40 = 112 + j 38,9 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_e + \dot{U}_{C2} = \varphi_e + \dot{I}_2 X_{C2} = 112 + j 38,9 + (1,937 - j 5,575)(-j 20) = 0,5 + j 0,16 \approx 0$$

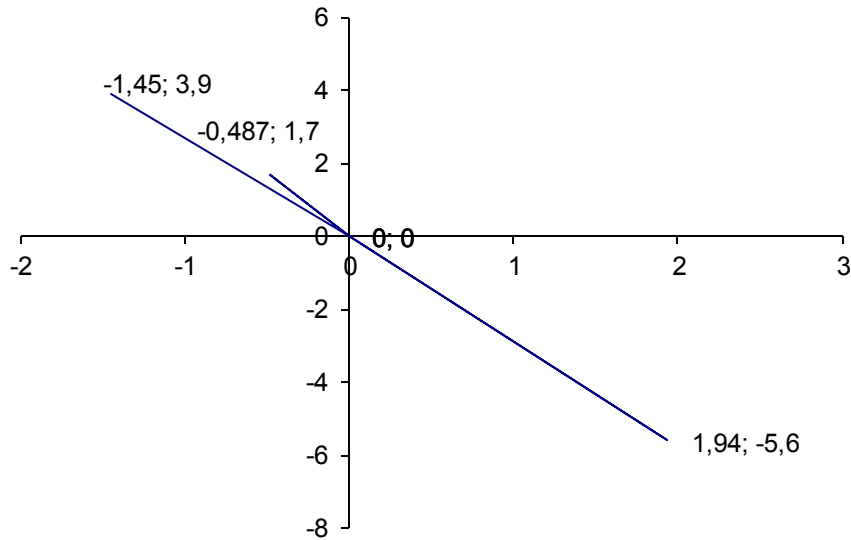


Рисунок 6.4. Векторна діаграма струмів.

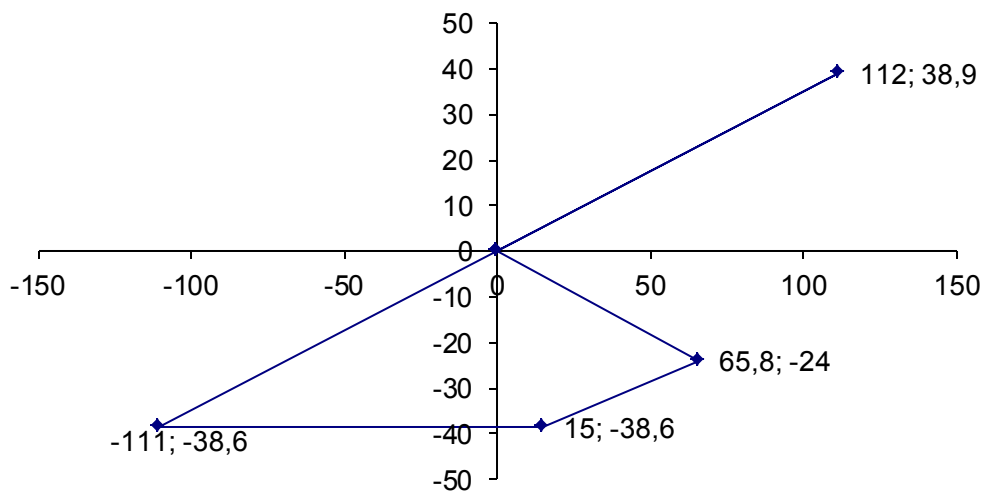


Рисунок 6.5 Топографічна діаграма

Питання для самоконтролю

1. Викладіть принцип одержання синусоїдного струму
2. Дайте визначення миттєвого та максимального значення, фази та початкової фази синусоїдного струму
3. Викладіть основні відомості про параметри електричних кіл при змінному струмі
4. Чому при розрахунку кіл постійного струму враховується тільки їх опір, а при змінному струмі також їх ємність та індуктивність?
5. Який зсув по фазі між напругою та струмом в колі з активним, індуктивним та ємнісним навантаженням?
6. Яку потужність в колі змінного струму вимірює ватметр?
7. Як перейти від комплексної амплітуди до миттєвого значення струму (напруги)?
8. У чому полягає явище резонансу напруг?
9. У чому полягає явище резонансу струмів?
10. Який опір кола при паралельному з'єднанні резистора, котушки й конденсатора?

Задачі для самостійного розв'язання

Для електричної схеми, відповідної номеру варіанту (таб.6.1) і зображеною на рис. 6.6-6.9, виконати наступне:

1. На основі законів Кирхгофа скласти в загальному вигляді систему рівнянь для розрахунку струмів в усіх гілках кола, записавши її в двох формах:

- а) диференціальною;
- б) символічною.

2. Знайти комплекси діючих значень струмів в усіх гілках, скориставшись одним з методів розрахунку лінійних електричних кіл.

3. За результатами, отриманими в п. 2, визначити покази ватметра двома способами: а) за допомогою вираження для комплексів струму і напруги на ватметрі; б) за формулою $UI \cos \varphi$.

За допомогою векторної діаграми струму і напруги, на яку реагує ватметр, пояснити визначення кута $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$

4. Побудувати топографічну діаграму, поєднану з векторною діаграмою струмів.

При цьому потенціал точки a , вказаної на схемі, прийняти рівним нулю.

5. Використовуючи дані розрахунків, отриманих в п. 2, записати вираження для миттєвого значення струму або напруги. Побудувати графік залежності

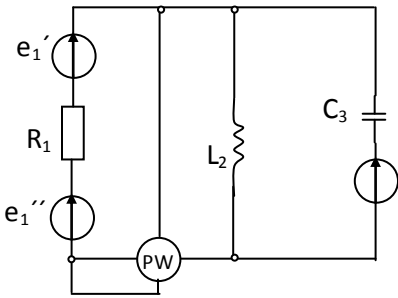


Рис.6.1

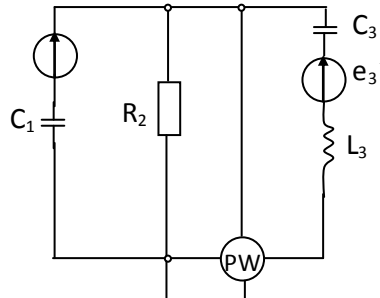


Рис.6.2

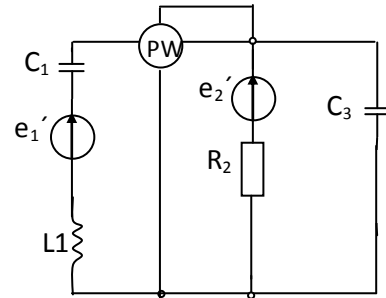


Рис.6.3

вказаної величини від ωt .

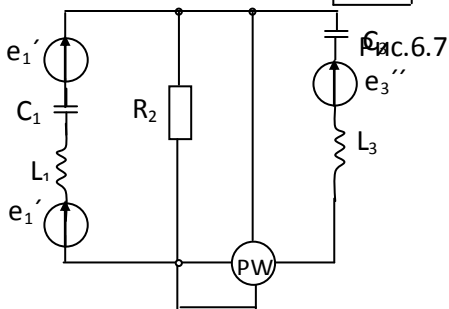
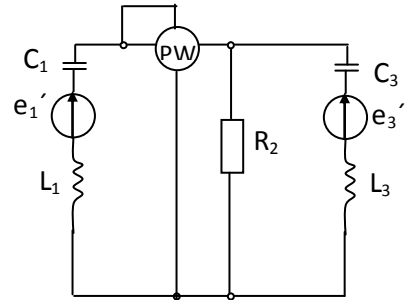
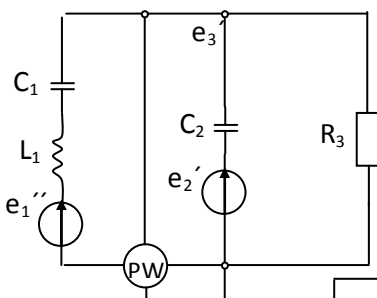


Рис.6.4

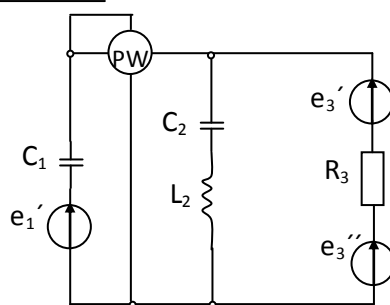


Рис.6.5

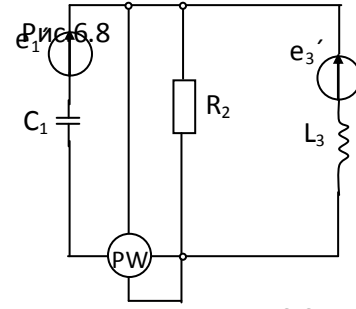


Рис.6.6

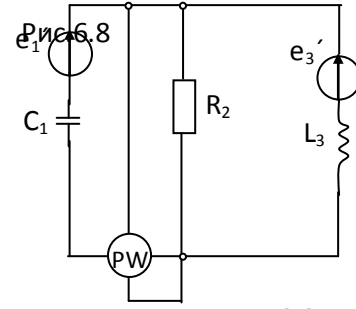


Рис.6.7

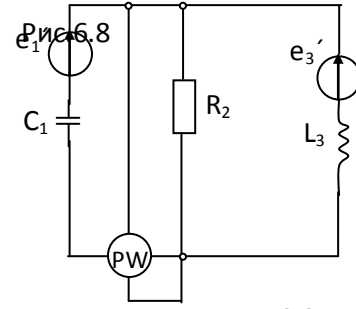


Рис.6.8

Таблиця 6.1

варіант	Номер	L ₁	L ₂	L ₃	C ₁	C ₂	C ₃	R ₁	R ₂	R ₃	f	e
		мГн			мкФ			Ом			Гц	В
1	6,1	-	34,7	-	-	-	80,3	17	-	-	55	$e'_1=80\sin(\omega t + 45^\circ)$ $e''_1=80\cos(\omega t - 135^\circ)$ $e'_3=56,6\cos(\omega t - 30^\circ)$
2	6,2	-	-	1000	20	-	8	-	25	-	40	$e'_1=566\cos(\omega t + 270^\circ)$ $e'_3=705\sin(\omega t - 180^\circ)$
3	6,3	100,5	-	-	88,5	-	132,5	-	25	-	60	$e'_1=70,5\sin(\omega t - 13^\circ)$ $e'_2=68,5\sin(\omega t - 84^\circ)$ $e''_2=56\cos(\omega t + 100^\circ)$
4	6,1	20,8	-	52,7	15,1	-	64,6	-	65	-	130	$e'_1=100\sin(\omega t - 35^\circ)$ $e''_1=100\sin(\omega t + 55^\circ)$ $e''_3=282\sin(\omega t - 40^\circ)$
5	6,5	-	250	-	31,8	-	66	-	-	100	50	$e'_1=141\cos(\omega t + 270^\circ)$ $e'_3=141\sin(\omega t + 90^\circ)$
6	6,6	-	-	159	15,9	-	-	-	100	-	10	$e''_1=169\sin \omega t$ $e'_2=169\cos \omega t$ $e'_3=169 \sin (\omega t + 180^\circ)$
7	6,7	24	-	-	12,7	5,5	-	-	-	10	50	$e''_1=282\sin \omega t$ $e'_2=282\sin(\omega t - 180^\circ)$
8	6,8	13,6	-	109,2	32,5	-	94,6	-	65	-	70	$e'_1=141\cos(\omega t - 90^\circ)$ $e''_3=282 \sin(\omega t - 50^\circ)$

Рекомендована література

Основна:

1. Ефимчик М.К. Основы радиоэлектроники.: учебник. / М.К.Ефимчик, С.С. Шушкевич.- Минск: Университет, 1986.-303с.
2. Сисоев В.М. “Основы радіоелектроніки”: підручник. / В.М. Сисоев.- Київ: “Вища школа”,2004.-279с.
3. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. / Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов.- М.: “Высшая школа”, 1985.-528с.
4. Каплянский А.Е. ТОЭ./ А.Е. Каплянский и др.- М.: “Высшая школа”, 1972.-448с.
5. Иванов А.А. Справочник по электротехнике. / А.А.Иванов.- К.: “Вища школа”, 1984.-224с.
6. Шебес Л.Р. Сборник упражнений и задач по ТОЭ. / Л.Р.Шебес.- М.: “Высшая школа”, 1989.-472с.
7. Ляшко М. Н. Сборник упражнений и задач по радиоэлектронике. / М. Н. Ляшко. – М.: “Высшая школа”, 1983.-160с.
- 8.Приходько О. В. “Основы сучасної електроніки”. Навчальний посібник. / О.В.Приходько, В.М. Синьокий, А.В. Ткаченко.- Запоріжжя:ЗНУ,2012.-108с.
9. Височанський Ю.М. Твердотільна електроніка.Лабораторний практикум. /Ю.М.Височанський, А.А.Горват,О.О.Грабар - Ужгород:”ІВА”,2001.-388с.

Додаткова

- 1.Трегуб А.П. Электротехника. / А.П.Трегуб.- Киев: “Вища школа,” 1987.-600с.
- 2.Данилов А.В. Теория нелинейных электрических цепей. / А.В.Данилов, П.Н.Матханов, Е.С.Филлипов.- Л.: “Энергоатомиздат,” 1990.-256с.
- 3.Сборник задач по общей электротехнике (под редакцией проф. Пенюшкина В.С.)- М.: “Высшая школа”, 1968.-280с.
- 4.Сигорский В.П. Основы теории электронных схем. / В.П. Сигорский, А.И. Петренко.– К.: “Вища школа”, 1971.-610с.
- 5.Зиновьев А.Л. Введение в теорию сигналов и цепей. / А.Л. Зиновьев, Л.И. Филиппов.- М.: “Радио и связь”, 1985.-254с.
- 6.Горшков Б.И. Радиотехнические устройства. / Б.И. Горшков.- М.: “Радио и связь”, 1984.-178с.
- 7.Васильев Д.В. Радиотехнические цепи и сигналы. / Д.В. Васильев и др.- М.: “Радио и связь”, 1982.-528с.
8. Рычина Т.Л. Электрорадиоэлементы. / Т.Л. Рычина.- М.: “Мир”, 1985.-336с.
9. Гершунский Б.С. Справочник по расчету электронных схем. / Б.С. Гершунский.– К.: “Высшая школа”, 1983.-242с.
10. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. / Степаненко И.П. – М.: “Энергия”, 1977.-671с.

11. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника. / Скаржепа В.А. и др. - К.: “Вища школа”, 1989.-279с.
12. Жеребцов И.П. Основы электроники. / И.П.Жеребцов.- Л.: “Госэнергоатомиздат”, 1989.-353с.
13. Цифровая и вычислительная техника (под редакцией Евреинова Э.В.)- М.: “Радио и связь”, 1991.-464с.
14. Источники вторичного электропитания (под редакцией Конева Ю.И.)- М.: “Радио и связь”, 1983.-280с.
15. Калабеков Б.А. Микропроцессоры и их применение в системах передачи и обработки сигналов. / Б.А. Калабеков.- М.: “Радио и связь”, 1988.-368с.
16. Галкин Л.А. Методические рекомендации к лабораторному практикуму «Основы радиоэлектроники». Выпуск 5»Приборы и правила пользования ими при выполнении лабораторных работ». / Л.А. Галкин.- Запорожье: ЗГУ, 1992.
17. Сисоев В.М. Радіотехніка з елементами обчислювальної техніки. Практикум./ В.М.Сисоев, В.П.Чернявський. - К.: “Вища школа”, 1986.-184с.
18. Колонтоевский Ю.Ф. Лабораторный практикум по радиоэлектронике. / Ю.Ф. Колонтоевский.- М.: “Высшая школа”, 1989.
19. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях./ В.А.Грановский, Т.Н. Сирая.- Л.: “Энергоатомиздат”, 1990.-288с.
20. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. / Т.М.Агаханян. -М.: “Энергоатомиздат”,1983.-464с.
21. Секлоф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. / С. Секлоф. -М.: “Мир”,1988.-584с.

Інформаційні ресурси

Електронний ресурс по предмету “Основи сучасної електроніки”:

- 1.<http://digteh.ru/proc/>
2. <http://www.computer-museum.ru/technology/02.htm>
3. <http://www.intuit.ru/department/hardware/digelectr/>
4. <http://www.intuit.ru/department/hardware/basdigtech/>
- 5..www.zntu.edu.ua
- 6..www.rtt.zntu.edu.ua