

Модуль 3

Електрика та магнетизм

Електричний струм

© Коломієць Р. О.

Грудень, 2020

1 Короткі теоретичні відомості

Електричний струм — це направлений рух заряджених частинок під дією електрорушійної сили (е.р.с.). Розрізняють електричний струм I роду, або *струм провідності* (він обумовлений рухом електронів і не супроводжується перенесенням речовини), електричний струм II роду, або *конвекційний струм* (він обумовлений рухом іонів та супроводжується перенесенням речовини, характерний для тіл у рідкому агрегатному стані) та *струм зміщення* (короткочасні електричні струми внаслідок зміщення зв'язаних електричних зарядів під дією зовнішнього електричного поля).

Кількісно електричний струм характеризується диференційною векторною величиною *густиною струму*, або у разі струму в дротах — інтегральною величиною, *силою струму*.

Густина струму — це векторна величину, що визначається як величина заряду, яка протікає крізь одиничну площу за одиницю часу. Вона позначається, зазвичай, латинською літерою **j** (жирний шрифт вказує на те, що це векторна величина):

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

де σ — питома електрична провідність середовища, а \mathbf{E} — напруженість електричного поля.

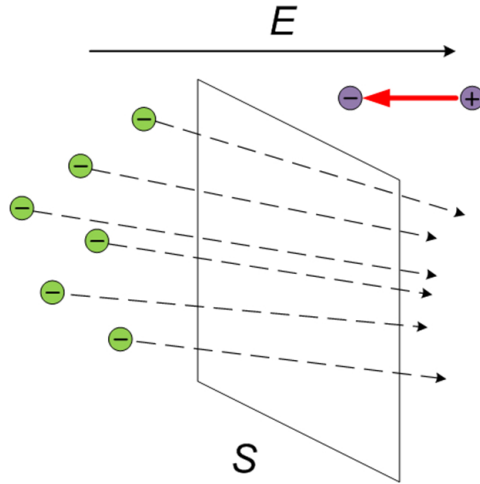


Рис. 1 – До визначення сили електричного струму

Силою струму (або просто струмом), що протікає провідником з площею поперечного перерізу S називається величина, яка відповідає кількості заряду Δq , переміщеному крізь переріз провідника за проміжок часу Δt :

$$I = \int_S \mathbf{j} ds = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

За *умовний* напрямок струму вибирають рух позитивно заряджених частинок. Отже, напрямок струму в металевих провідниках є протилежним до напрямку руху електронів.

Основними фізичними законами електричного струму є закон Ома для ділянки кола та повного кола, закон Джоуля–Ленца та закони Кірхгофа.

Закон Ома для ділянки кола стверджує, що

Сила струму на ділянці електричного кола прямо пропорційна електричній напрузі на цій ділянці та обернено пропорційна опору цієї ділянки:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Закон Ома для повного кола враховує неідеальність джерел напруги, та стверджує, що

Сила струму у електричному колі прямо пропорційна е.р.с., що діє у цьому колі та обернено пропорційна сумі загального електричного опору кола та внутрішнього опору джерела е.р.с.:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r_0}, \quad (2)$$

де r_0 — внутрішній опір джерела напруги.

При протіканні електричного струму через активний опір на ньому виділяється теплота, кількість якої визначається за законом Джоуля–Ленца:

Кількість теплоти за одиницю часу, яка виділяється на активному електричному опорі, прямо пропорційна квадрату сили струму або квадрату електричної напруги:

$$Q = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (3)$$

Крім активного електричного опору розрізняють ще і *реактивний* опір. Він характерний для елементів електричного кола, які мають електричну ємність та/або індуктивність і залежить від частоти:

$$X_L = j\omega L, \quad (4)$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad (5)$$

де $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця¹, $\omega = 2\pi f$ — колова частота протікаючого змінного електричного струму із частотою f , L — індуктивність, C — електрична ємність.

¹У фізиці електричного струму та електротехніці прийнято позначати великими літерами U та I напругу та силу струму, коли він постійний, і маленькими літерами u та i — коли він змінний. Через це уявну одиницю позначають j , щоб не плутати із струмом. Густина струму — це векторна величина, і тому позначається \vec{j} або (рідше) \vec{j} .

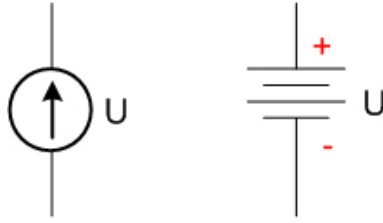


Рис. 2 – Умовні позначення джерела напруги на електричній схемі

Реактивний електричний опір характеризує втрати в електричному колі на поляризацію діелектрика (X_C — ємнісний опір) або на створення магнітного поля (X_L — індуктивний опір).

Повний електричний опір в загальному випадку є комплексною величиною виду

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right). \quad (6)$$

У типових задачах, пов'язаних із електричним струмом, як правило, є відомими опори та напруги джерел живлення, а потрібно знайти невідомі струми. Також у задачі задається *схема електричного кола* — умовне позначення елементів електричного кола та з'єднань між ними. Коротко розглянемо, що це все означає.

Джерело напруги, або джерело е.р.с. позначається так, як показано на рис. 2. Ліворуч показане загальне позначення, коли напруга може бути як постійною, так і змінною. Стрілка вказує *умовний* позитивний напрямок. Праворуч показаний гальванічний елемент, який виробляє лише постійну напругу.

Електричний опір показується так, як зображено на рис. 3. Якщо електричний опір позначений літерою Z — то це комплексний опір, тобто реально це може бути достатньо складна схема, що складається із довільної кількості резисторів, конденсаторів та котушок індуктивності, які можуть бути як завгодно з'єднані між собою, але вони можуть бути за певними правилами об'єднані у *двохполюсник* (тобто те, що має один вхід і один вихід) таким чином, що при розрахунках його можна використовувати як один елемент. Якщо опір позначений літерою R — то це активний опір.

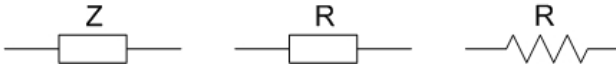


Рис. 3 – Умовні позначення електричного опору на схемі

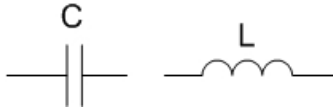


Рис. 4 – Умовні позначення конденсаторів та котушок індуктивності на схемі

Конденсатори і котушки індуктивності позначаються так, як показано на рис. 4. Існують також полярні конденсатори та котушки індуктивності із феромагнітним осердям, які мають трошки інше умовне графічне позначення, але зараз нас такі тонкощі не цікавлять.

Окремо слід згадати з'єднання, оскільки тут часто робляться помилки. Електричне з'єднання (тобто по цим дротам реально тече струм, і він перетікає із одного дроту в інший) показується на схемах крапкою (рис. 5). Це місце з'єднання називається *вузлом*. Виняток зроблений лише для цифрових схем (тобто таких, де протікають лише два значення струму, умовно "0" і "1") — але лише для *шин*, тобто паралельного з'єднання не менше 8 дротів для паралельної передачі інформації байтами (у цьому випадку головна шина показується суцільною потовщеною лінією). При перетині (без крапки на електричній схемі) струм з одного дроту на інший не перетікає.

Елементи електричної схеми можуть з'єднуватися послідовно та паралельно. Як послідовне, так і паралельне з'єднання допу-



Рис. 5 – Умовне графічне позначення з'єднання та перетину дротів на електричних схемах

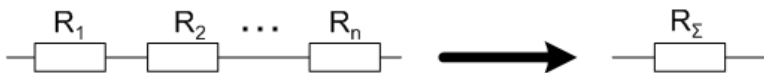


Рис. 6 – Перетворення послідовного з’єднання електричних елементів

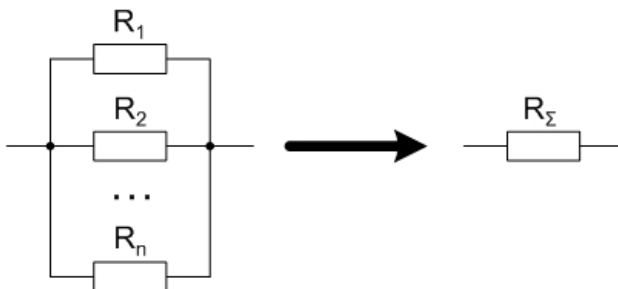


Рис. 7 – Перетворення паралельного з’єднання електричних елементів

скає спрощення схеми шляхом об’єднання елементів. На рис. 6 та 7 показане таке перетворення. При цьому результуючий опір R_Σ для послідовного з’єднання

$$R_\Sigma = \sum_{k=1}^n R_k = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (7)$$

а для паралельного з’єднання

$$\frac{1}{R_\Sigma} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (8)$$

Частина електричної схеми між двома вузлами називається *гілкою*. Послідовність гілок, при якій утворюється замкнене коло, причому хоча б у одній гілці повинне бути джерело напруги, називається *контуром*. Для того, щоб точно сказати, скільки у схемі вузлів та контурів, її потрібно попередньо проаналізувати. Наприклад, на рисунку 8 ліворуч показана схема з шістьма вузлами. На перший погляд може здатися, що у схемі чотири контури та вісім

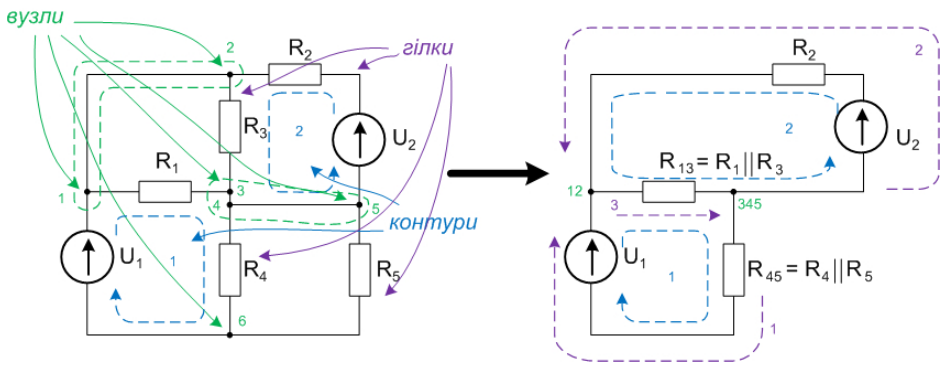


Рис. 8 – Електричної схеми та її спрощення

гілок, але це не так. І вузлів у схемі також менше. Якщо уважно подивитися, то вузли 1 та 2 можна об'єднати в один вузол, і те ж саме можна зробити із вузлами 3, 4 і 5. Так можна робити, тому що гілки між вузлами 1 і 2, а також між 3 і 4 та 4 і 5 не мають ніяких елементів — це просто дріт, такі гілки із схеми можна видаляти, не забуваючи при цьому об'єднувати вузли. Якщо так зробити, то виявиться, що опори R_1 і R_3 з'єднані паралельно, і також паралельно з'єднані опори R_4 та R_5 . На рисунку праворуч показана перетворена схема, на ній названі вузли об'єднані у нові вузли (позначені зеленим кольором — 12 і 345), а опори R_{13} та R_{45} є результатом об'єднання опорів по формулі 8. Таким чином, насправді цю схему можна розглядати як таку, що складається із двох контурів (позначені синім кольором) і трьох гілок (позначені фіолетовим кольором).

Для окремих частин електричного кола справедливі *закони Кірхгофа*. Перший закон Кірхгофа формулюється для вузлів (його ще називають законом вузлової точки) і він стверджує, що

Алгебраїчна сума струмів на будь-якому вузлі електричної схеми дорівнює нулю.

При розв'язанні задач струми у гілках електричної схеми напрямки струмів розставляють майже довільно. "Майже" — тому що якщо у деякій гілці є джерело е.р.с., у якого заданий умовний позитивний напрямок, то, як правило, напрямком струму у цій гілці вибирається

такий самий. Проте якщо вибрати протилежний напрямок струму, то все одно для схеми можна скласти всі рівняння та розв'язати їх. Якщо ж у гілці немає джерела е.р.с., то напрямок струму вибирається такий самий, як при обході контуру, до якого входить ця гілка. Якщо ж гілка входить одночасно у два контури (як гілка між вузлами 12 та 345 на рис. 8) — то напрямок струму в ній дійсно можна вибрати довільним. Якщо при розв'язанні рівнянь для якогось струму виходить від'ємне значення, то це означає, що *реальний* напрямок цього струму протилежний до того, який був припущений, щоб скласти рівняння.

По першому закону Кірхгофа складається кількість рівнянь, на одиницю менша, ніж кількість вузлів у схемі. Прийнято позначати струми, які "втікають" у вузол, із знаком «+», а ті, які "витікають" з нього — із знаком «-».

Другий закон Кірхгофа стосується контурів, і він говорить, що

Вздовж замкненого контуру сума падінь напруги дорівнює сумі всіх е.р.с., що діють в цьому контурі.

При складанні рівняння за другим законом Кірхгофа потрібно вибрати напрямок обходу контуру — за годинниковою стрілкою чи проти. Як правило, напрямок обирається такий самий, як направлене основне джерело напруги у цьому контурі.

По другому закону Кірхгофа складається така кількість рівнянь, щоб загальна кількість рівнянь по першому закону і другому дорівнювала кількості невідомих струмів. Наприклад, схема, представлена на рис. 8, має два вузли і два контури. Таким чином, для неї буде складено одне рівняння по першому закону Кірхгофа, і два рівняння по другому закону Кірхгофа — всього три рівняння. Невідомими у цій системі рівнянь будуть струми гілок — а гілок у схемі три.

Важливо відзначити, що всі рівняння, які складаються по законам Кірхгофа є лінійними, а методи розв'язування систем лінійних рівнянь добре вивчені і алгоритмізовані (тобто при їх розв'язуванні не потрібно проявляти ніякої творчості — це суто механічна робо-

та, яку можна покласти на комп'ютерну програму) за допомогою алгебри матриць.

Закони Кірхгофа є прямим наслідком закону збереження енергії. Вони можуть бути застосовані для розрахунку електричних схем будь-якої складності, проте для достатньо складних схем в електротехніці часто використовуються модифіковані методи — метод *контурних струмів* та метод *вузлових потенціалів*. Зокрема, саме метод вузлових потенціалів лежить в основі роботи SPICE-симуляторів — САПР² для розробки електронних схем.

2 Приклади розв'язування задач

Задача 1

На рис. 9 представлена схема з'єднання опорів. Перетворити її на еквівалентний опір та обчислити його значення, якщо:

$$R_1 = 100 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 200 \text{ Ом},$$

$$R_3 = 300 \text{ Ом},$$

$$R_4 = 100 \text{ Ом},$$

$$R_5 = 200 \text{ Ом},$$

$$R_6 = 100 \text{ Ом},$$

$$R_7 = 200 \text{ Ом}.$$

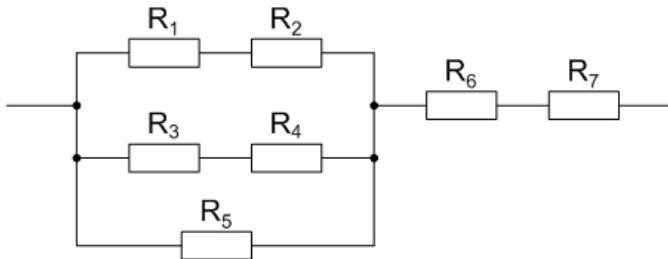


Рис. 9 – До задачі 1

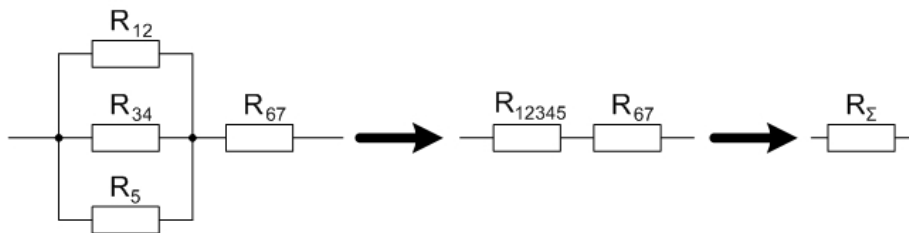


Рис. 10 – До задачі 1

Розв'язання

Для початку визначимо, у якій послідовності будуть об'єднуватися опори. Послідовно з'єднані опори R_1 і R_2 , R_3 і R_4 , R_6 і R_7 — вони будуть об'єднуватися згідно рис. 6 і 10 і значення нових опорів обчислюються за формулою (7):

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2, \\ R_{34} &= R_3 + R_4, \\ R_{67} &= R_6 + R_7. \end{aligned} \tag{9}$$

У результати таких перетворень бачимо, опори R_{12} , R_{34} та R_5 з'єднані паралельно, і тому вони можуть бути об'єднані в опір R_{12345} згідно рис. 7 і 10 і його значення обчислюється за формулою (8):

$$\frac{1}{R_{12345}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{34}} + \frac{1}{R_5}. \tag{10}$$

І, наостанок, отриманий опір R_{12345} об'єднується за правилом послідовного з'єднання опорів із опором R_{67} :

$$R_{\Sigma} = R_{12345} + R_{67}. \tag{11}$$

Далі обчислення можна або виконувати безпосередньо за формулами (9) — (11), або спочатку на їх основі вивести підсумкову формулу, а потім підставити у неї всі вхідні дані та отримати результат. Але, враховуючи те, що у формулі (10) потрібно дріб приводити до спільного знаменника, а опори R_{12} і R_{34} являють собою

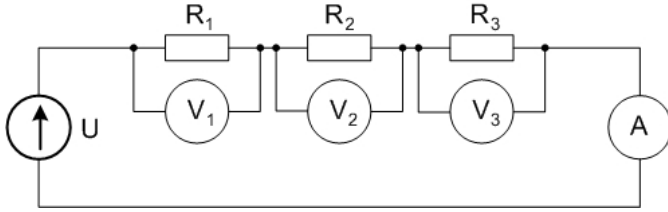


Рис. 11 – До задачі 2

суми, то потрібно буде перемножувати багаточлени, а під час такої операції легко зробити помилку і в результаті майже напевне получится громіздкий вираз, то тут краще піти першим шляхом.

Отже:

$$R_{12} = 100 + 200 = 300 \text{ Ом},$$

$$R_{34} = 300 + 100 = 400 \text{ Ом},$$

$$R_{67} = 100 + 200 = 300 \text{ Ом},$$

$$\frac{1}{R_{12345}} = \frac{1}{300} + \frac{1}{400} + \frac{1}{200} = 0,0033 + 0,0025 + 0,0050 = 0,0108 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{12345} = \frac{1}{0,0108} = 92,6 \text{ Ом},$$

$$R_{\Sigma} = 92,6 + 300 = 392,6 \text{ Ом}$$

Відповідь: $R_{\Sigma} = 392,6 \text{ Ом}$.

Задача 2

Для даної електричної схеми (рис. 11) визначити показники амперметра і вольтметрів, якщо $U = 12 \text{ В}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 200 \text{ Ом}$, $R_3 = 300 \text{ Ом}$. Джерело напруги вважати ідеальним.

Розв'язання

Оскільки всі три опори з'єднані послідовно, то струм через них буде однаковим. У ідеального джерела напруги внутрішній опір дорівнює нулю, і тому в даному випадку можна скористатися законом Ома для ділянки кола:

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

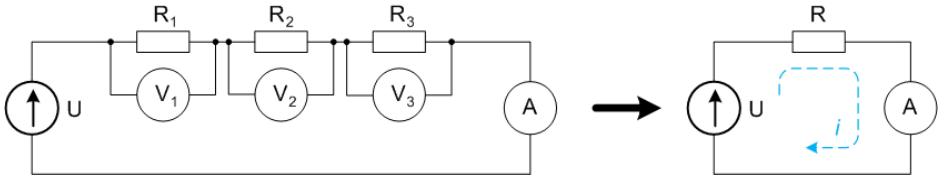


Рис. 12 – До задачі 2

де R — загальний еквівалентний опір схеми для джерела напруги (рис. 12). Струм I направимо так само, як направлена е.р.с. у схемі.

Оскільки в даному випадку опори з'єднані послідовно, то їх еквівалентний опір буде дорівнювати сумі опорів:

$$R = \sum R_k = R_1 + R_2 + R_3.$$

Обчислюємо сумарний опір:

$$R = 100 + 200 + 300 = 600 \text{ Ом.}$$

Струм, який показує амперметр:

$$I = \frac{12}{600} = 0,02 \text{ А} = 20 \text{ мА.}$$

Напруга на кожному опорі теж буде визначатися за законом Ома, але сума всіх напруг повинна дорівнювати напрузі від джерела живлення.

$$U_k = IR_k,$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = U. \quad (12)$$

Знаючи струм та опори, проводимо обчислення:

$$U_1 = IR_1 = 0,02 \cdot 100 = 2 \text{ В,}$$

$$U_2 = IR_2 = 0,02 \cdot 200 = 4 \text{ В,}$$

$$U_3 = IR_3 = 0,02 \cdot 300 = 6 \text{ В.}$$

Виконаємо перевірку за формулою (12):

$$U = 2 + 4 + 6 = 12 \text{ В.}$$

Відповідь: $I = 0,02 \text{ А}$, $U_1 = 2 \text{ В}$, $U_2 = 4 \text{ В}$, $U_3 = 6 \text{ В}$.

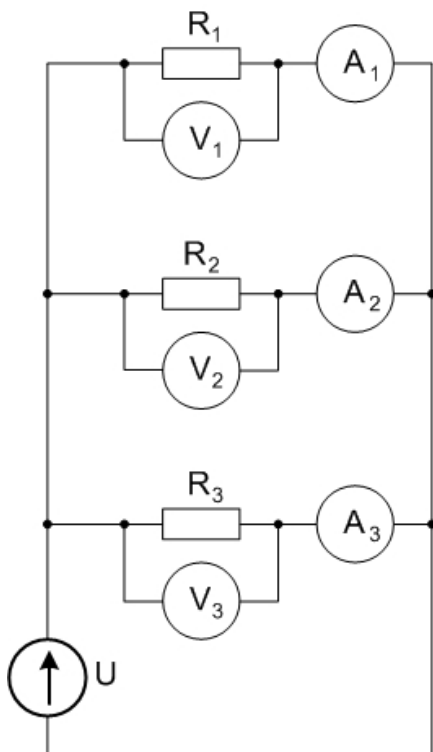


Рис. 13 – До задачі 3

Задача 3

Для даної електричної схеми (рис. 13) визначити показники амперметра і вольтметрів, якщо $U = 12$ В, $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 300$ Ом. Джерело напруги вважати ідеальним.

Розв'язання

Аналізуючи схему на рис. 13 приходимо до висновку, що її можна дещо видозмінити, як це показано на рис. 14 шляхом об'єднання вузлів. Оскільки амперметр має дуже малий внутрішній опір, а вольтметр — дуже великий, то можна вважати, що для джерела напруги ця схема складається з трьох паралельно з'єднаних опорів. Кожен вольтметр буде показувати одну і ту ж саму напругу — і її значення буде таким самим, як видає джерело живлення, тобто

$$V_1 = V_2 = V_3 = U = 12 \text{ В.}$$

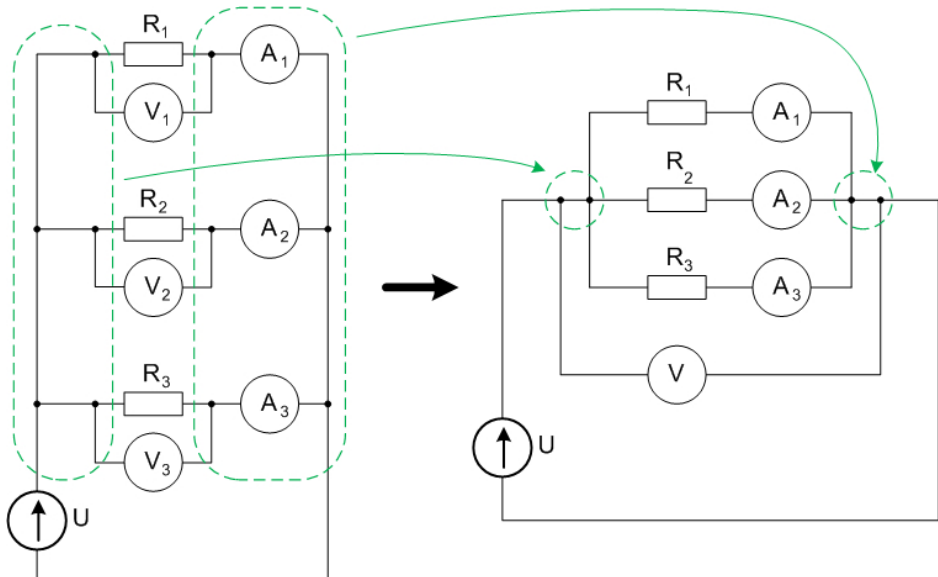


Рис. 14 – До задачі 3

Тепер визначаємо струми у гілках схеми за законом Ома для ділянки кола:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12}{100} = 0,12 \text{ A,}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{12}{200} = 0,06 \text{ A,}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{12}{300} = 0,04 \text{ A.}$$

Виконаємо перевірку. Сумарний струм у цій схемі повинен бути таким самим, який би був би тоді, коли ці три паралельних опори об'єднати в один:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\Sigma}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \\ &= \frac{1}{100} + \frac{1}{200} + \frac{1}{300} = 0,0100 + 0,0050 + 0,0033 = 0,0183 \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_{\Sigma} = \frac{1}{0,0183} = 54,6 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

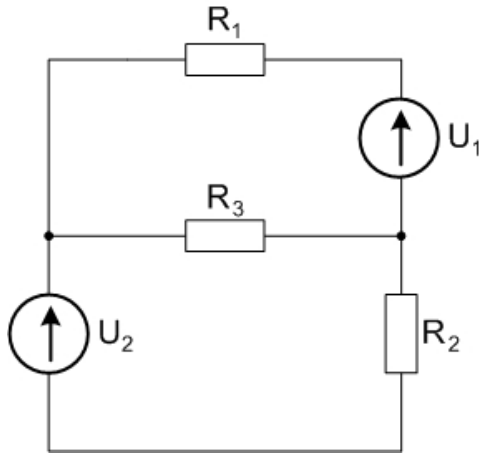


Рис. 15 – До задачі 4

$$I_{\Sigma} = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{12}{54,6} = 0,219 \text{ A.}$$

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 = 0,12 + 0,06 + 0,04 = 0,22 \text{ A.}$$

Як бачимо, обчислення в останніх двох рядках дають практично однаковий результат, тому вважаємо, що різниця обумовлена похибкою округлення.

Відповідь: $V_1 = V_2 = V_3 = U = 12 \text{ В}$, $I_1 = 0,12 \text{ А}$, $I_2 = 0,06 \text{ А}$, $I_3 = 0,04 \text{ А}$.

Задача 4

Розрахувати струми у гілках даної електричної схеми (рис. 15), якщо:

$$R_1 = 100 \text{ Ом,}$$

$$R_2 = 200 \text{ Ом,}$$

$$R_3 = 300 \text{ Ом,}$$

$$U_1 = 9 \text{ В,}$$

$$U_2 = 12 \text{ В.}$$

Розв'язання

Задачі на розрахунок струмів у гілках електричної схеми розв'язуються шляхом складання системи лінійних рівнянь по законам Кірхгофа.

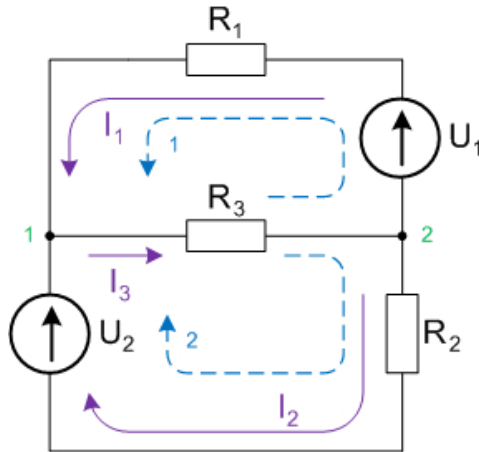


Рис. 16 – До задачі 4

Для цього спочатку потрібно розставити напрямки протікання струмів та напрямки обходу контурів (для 2-го закону Кірхгофа) — рис. 16.

У даній схемі два вузли (на рис. 16 позначені зеленими цифрами 1 і 2) і три гілки. Позначимо суцільними фіолетовими лініями струми відповідно до гілок: струм I_1 протікає через опір R_1 , струм I_2 — через опір R_2 , і струм I_3 — через опір R_3 . Виділимо в схемі два контури: перший буде включати опори R_1 та R_3 і в ньому діє е.р.с. U_1 , а другий буде включати опори R_2 та R_3 і в ньому діє е.р.с. U_2 . Напрямки обходу контурів виберемо такими, як і у відповідних струмів (на рис. 16 напрямки обходу контурів показані синіми штриховими лініями).

По першому закону Кірхгофа складається на одне рівняння менше, ніж вузлів у схемі. Прийнято струм, який "втікає" у вузол позначати із знаком «+», а струм, який "витікає" з вузла — із знаком «-». Тоді для 1-го вузла

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (13)$$

Оскільки у задачі три невідомих струми, то потрібно мати систему із трьох рівнянь. Недостаючі два рівняння треба скласти згідно другого закону Кірхгофа.

Для першого контура рівняння по другому закону Кірхгофа запишеться наступним чином:

$$I_1 R_1 + I_2 \cdot 0 + I_3 R_3 = U_1. \quad (14)$$

При струмі I_2 в цьому рівнянні стоїть 0, оскільки цей струм в даному контурі не протікає, і у рівняння для цього контуру він входить не повинен. Але, оскільки треба буде складати *систему рівнянь*, яку треба буде розв'язувати, мусимо поставити у матрицю системи якийсь коефіцієнт. Тому ставимо 0.

Аналогічно для 2-го контура:

$$I_1 \cdot 0 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = U_2. \quad (15)$$

Знаки у рівняннях, які складаються по другому закону Кірхгофа, розставляються згідно наступного принципу: якщо напрямок струму у гілці, що входить у контур, співпадає із напрямком обходу контура, то перед таким струмом ставиться знак «+», якщо ні — то «-». Аналогічно із знаком напруги у правій частині рівняння — якщо напрямок е.р.с. співпадає із напрямком обходу контура — то ця напруга входить у рівняння із знаком «+», якщо ні — то із знаком «-». Якщо якийсь струм у контурі відсутній (тобто гілка, у якій протікає цей струм, у даний контур не входить) — то біля такого струму ставиться коефіцієнт 0, і тоді байдуже, з яким знаком його записувати.

Отже, зводимо рівняння (13) — (15) у одну систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 R_1 + I_2 \cdot 0 + I_3 R_3 = U_1 \\ I_1 \cdot 0 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = U_2 \end{cases}$$

і підставляємо у неї всі числа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 100I_1 + 0 \cdot I_2 + 300I_3 = 9 \\ 0 \cdot I_1 + 200I_2 + 300I_3 = 12 \end{cases}$$

Розв'яжемо цю систему методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 100 & 0 & 300 \\ 0 & 200 & 300 \end{vmatrix} = -1,1 \cdot 10^5,$$

$$\Delta_{I_1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 9 & 0 & 300 \\ 12 & 200 & 300 \end{vmatrix} = -900,$$

$$\Delta_{I_2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 100 & 9 & 300 \\ 0 & 12 & 300 \end{vmatrix} = -2,1 \cdot 10^3,$$

$$\Delta_{I_3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 100 & 0 & 9 \\ 0 & 200 & 12 \end{vmatrix} = -3 \cdot 10^3,$$

$$I_1 = \frac{\Delta_{I_1}}{\Delta} = \frac{-900}{-1,1 \cdot 10^5} = 0,008 \text{ A} = 8 \text{ mA},$$

$$I_2 = \frac{\Delta_{I_2}}{\Delta} = \frac{-2,1 \cdot 10^3}{-1,1 \cdot 10^5} = 0,019 \text{ A} = 19 \text{ mA},$$

$$I_3 = \frac{\Delta_{I_3}}{\Delta} = \frac{-3 \cdot 10^3}{-1,1 \cdot 10^5} = 0,027 \text{ A} = 27 \text{ mA}.$$

Перевірка струмів по першому рівнянню показує, що

$$8 \text{ (mA)} + 19 \text{ (mA)} = 27 \text{ (mA)},$$

тобто баланс струмів сходиться.

Відповідь: $I_1 = 8 \text{ mA}$, $I_2 = 19 \text{ mA}$, $I_3 = 27 \text{ mA}$.