

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул

ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»,
спеціалізацій «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»,
«Електричні машини і апарати», «Інжиніринг та автоматизація
електротехнічних комплексів» й «Мехатроніка енергоємних виробництв»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Рецензенти: *Бур'ян С.О.*, канд. техн. наук, доц., кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, факультет електроенерготехніки та автоматики

Відповідальний редактор *Перетятко Ю. В.*, канд. техн. наук, доц.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 29.03.2018 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 8 від 27.03.2018 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Бурик Микола Петрович, канд. техн. наук
Спінул Людмила Юріївна, канд. техн. наук, доц.

ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Лінійні електричні кола постійного струму: Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізацій «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», «Інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів» й «Мехатроніка енергоємних виробництв» / М.П. Бурик, Л.Ю. Спінул ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,51 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 46 с.

Представлено основні положення для аналізу складних електричних кіл постійного струму з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" та загальні правила виконання електричних схем відповідно до єдиної системи конструкторської документації та державного стандарту України. Приведено короткі теоретичні відомості з методів розрахунку лінійних кіл та еквівалентного перетворення пасивних ділянок, що найбільш часто використовують на практиці. Розглянуто принцип побудови потенціальних діаграм для замкнутого контуру.

Призначений для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, 2018
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
Основні положення.....	6
1 Правила виконання електричних схем.....	9
1.1 Загальні вимоги до виконання електричних схем.....	10
2 Методи розрахунку кіл постійного струму.....	14
2.1 Метод контурних струмів.....	16
2.2 Метод вузлових потенціалів.....	17
2.3 Метод еквівалентного генератора.....	18
3 Потенціальна діаграма.....	20
4 Еквівалентні перетворення в електричних колах.....	21
5 Завдання до розрахунково-графічної роботи.....	24
Список використаних джерел.....	27
Додаток А Приклад оформлення розрахунково-графічної роботи.....	28

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСТУ – державного стандарту України

ЕРС – електрорушійна сила

ЄСКД – єдина система конструкторської документації

РГР – розрахунково-графічна робота

УГЗ – умовне графічне зображення

УГП – умовне графічне позначення

E – ідеальне джерело ЕРС

I – електричний струм

J – ідеальне джерело струму

R – активний опір

U – електрична напруга

φ – потенціал електричного поля

ВСТУП

Вивчення курсу "Теоретичні основи електротехніки" не можливе без отримання практичних навичок, що набуваються під час розв'язування задач за його розділами. Тому метою навчального посібника до виконання РГР є засвоєння студентами основ теорії лінійних кіл постійного струму та ознайомлення з загальними правилами виконання електричних схем відповідно до єдиної системи конструкторської документації та державного стандарту України (використані ДСТУ мають статус діючих в Україні).

Представлені методи контурних струмів, вузлових потенціалів та еквівалентного генератора використовуються для дослідження складних електричних кіл. Закони Ома та Кірхгофа є основою запропонованих методів та встановлюють зв'язки між величинами, що характеризують стан електричного кола. Визначення коефіцієнтів системи рівнянь безпосередньо за структурою схеми є перевагою наведених методик. Достовірність визначених струмів та напруг у електричних колах перевіряються за балансом потужностей та законами Кірхгофа.

Для зручності виконання РГР навчальний посібник має додаток А, в якому показано приклад оформлення та аналіз складного електричного кола. Також наведено індивідуальні варіанти для самостійного виконання студентами РГР. Номер варіанта для студента задає викладач, який проводить практичні заняття.

Навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які вивчають дисципліну "Теоретичні основи електротехніки".

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Теорія електричних кіл спирається на основні фізичні поняття про електричні та магнітні явища. З них починається розуміння електромагнітних процесів, що відбуваються в електричному колі. В свою чергу *електричне коло* – сукупність пристроїв, які утворюють замкнутий шлях для проходження електричного струму. Складові електричного кола, що виконують певні функції, називаються *елементами* електричного кола. *Основні* елементи електричного кола це – джерела енергії та її споживачі [1]. Наведемо основні терміни та визначення згідно з [2], які використовуються під час аналізу електричних кіл.

Лінійне електричне коло – електричне коло, електричні параметри якого не залежать від значень та напрямків струмів і напруг кола.

Схема заміщення – схема електричного кола, яка відображає властивості кола за певних умов.

Еквівалентна електрична схема – електрична схема заміщення, в якій величини, що підлягають розгляду, мають ті ж значення, що й у вихідній схемі заміщення.

Електрорушійна сила (E) – скалярна величина, якою характеризують здатність стороннього поля та індукованого електричного поля викликати електричний струм.

Елемент електричного кола – окремий електротехнічний пристрій, який входить до складу електричного кола і який виконує у ньому певну функцію. Існують пасивні (що не містять джерел ЕРС) та активні (що містять в собі чи самі є джерелами ЕРС) елементи електричного кола.

Джерело електрорушійної сили – джерело електромагнітної енергії, яке характеризується електрорушійною силою та внутрішнім опором.

Ідеальне джерело електрорушійної сили – джерело електрорушійної сили, внутрішній електричний опір якого дорівнює нулю і напруга якого не залежить від струму, що в ньому протікає.

Резистор (R) – елемент електричного кола, призначений для використання його електричного опору.

Електричний опір (R) – чинник теплового розсіювання електричної енергії, який визначають як відношення постійної наруги на ділянці електричного кола до постійного струму в ній в разі відсутності на ділянці ЕРС.

Провідність (G) – величина, обернена до електричного опору.

Джерело струму – джерело електромагнітної енергії, яке характеризується струмом в ньому та внутрішньою провідністю.

Ідеальне джерело струму (J) – джерело струму, внутрішня провідність якого дорівнює нулю і струм якого не залежить від наруги на його затискачах.

Потенціал електричного поля (φ) – фізична скалярна величина, яка є енергетичною характеристикою взаємодії зарядів у даній точці поля та обчислюється як лінійний інтеграл вектора напруженості поля вздовж довільного шляху від фіксованої точки [1].

Електрична наруга (U) – скалярна величина, що дорівнює лінійному інтегралу напруженості електричного поля.

Різниця електричних потенціалів (U) – електрична наруга в безвихровому електричному полі, яка характеризується незалежністю від вибраного шляху інтегрування.

Спад напруг (U) – наруга на ділянці електричного кола чи елементі кола.

Електричний струм провідності (I) – явище направленого руху вільних носіїв електричного заряду у речовині чи вакуумі.

Сила струму провідності (I) – скалярна величина, яка характеризує величину струму провідності і дорівнює похідній у часі від електричного заряду, який переносять носії заряду через певну поверхню. Умовно за напрямок струму провідності приймають напрямок руху позитивних зарядів.

Електропровідність – властивість речовини проводити під дією незмінного у часі електричного поля незмінний у часі електричний струм.

Електричні кола, в яких створення електричної енергії у джерелах, її передача та перетворення у споживачах відбувається за сталих у часі струмах та напругах, зазвичай називають *колами постійного струму* [3]. Електричне коло створюється за допомогою з'єднання полюсів пасивних та активних елементів, які входять до його складу та зображується у вигляді вузлів та віток.

Планарна схема електричного кола – схема електричного кола, яка на площині може бути зображена так, щоб вітки схеми не перетиналися.

Вітка електричного кола – ділянка електричного кола, по елементам якої протікає один і той самий струм.

Вузол електричного кола – місце з'єднання трьох чи більше віток електричного кола.

Електричне з'єднання – з'єднання ділянок електричного кола, внаслідок якого утворюється електричне коло.

Послідовне з'єднання – з'єднання, в якому через усі його елементи протікає один і той самий струм.

Паралельне з'єднання – з'єднання, в якому усі вітки з'єднуються з одною парою вузлів, тобто знаходяться під дією однієї і тієї самої напруги.

Шлях – сукупність віток, які з'єднують початковий та кінцевий вузли [4].

Контур – замкнутий шлях, в якому початковий та кінцевий вузли співпадають [4].

Незалежний контур – контур в якому дійсний струм його вітки дорівнює струму цього контуру [3].

Простим електричним колом називається коло, що складається з одного джерела електричної енергії та будь-якої кількості послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії, які поступовим перетворенням

можна звести до одного еквівалентного опору. *Складним* називають коло, в якому групи споживачів не можна звести до одного еквівалентного опору [5].

1 ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

ЄСКД призначена для встановлення в організаціях та на підприємствах єдиних правил виконання, оформлення та обертання конструкторської документації [6]. Тому елементи електричного кола представляють на схемах у вигляді умовних графічних зображень (УГЗ) відповідно до правил ЄСКД та ДСТУ, згідно яких:

- *схема* – це конструкторський документ, на якому представлені у вигляді УГЗ або позначень (УГП) складові частини виробу та зв'язки між ними;

- *елемент схеми* – це складова частина схеми, яка виконує певну функцію у виробі та не може бути розділена на частини, має самостійне призначення та власне графічне та літерно-цифрове позначення;

- *лінія взаємозв'язку* – відрізок лінії, який показує наявність зв'язку між функціональними складовими виробу згідно з ГОСТ 2.701-84.

Схема електрична – це документ, в якому представлені у вигляді УГЗ або позначень складові частини виробу, що діють за допомогою електричної енергії, та їх взаємозв'язку згідно з ДСТУ ГОСТ 2.702:2013.

Під час оформлення графічної частини розрахункової роботи (електричні схеми) треба дотримуватись правил, що наведені в ДСТУ ГОСТ 2.702:2013:

- елементи та пристрої зображують на схемі у вигляді УГЗ;
- порядкові номери елементам слід надавати, починаючи з одиниці, у межах групи елементів, яким на схемі надано однакове літерне позначення, наприклад *R1*, *R2* та *R3*;
- порядкові номери потрібно надавати у відповідності до розміщення елементів та пристроїв на схемі зверху до низу у напрямку зліва направо;

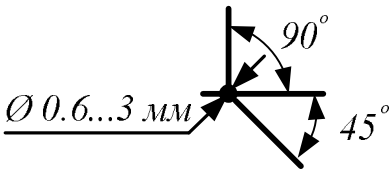
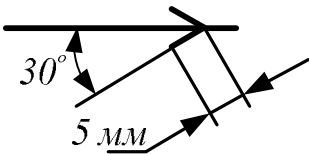
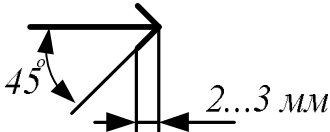
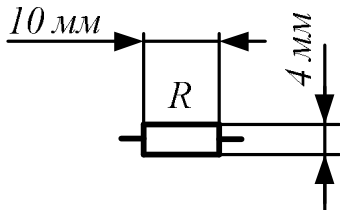
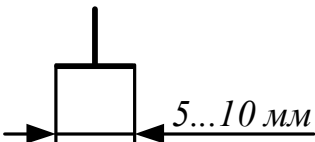
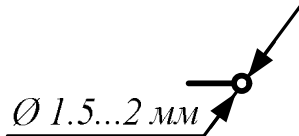
- позиційні позначення проставляють на схемі біля УГЗ елементів з правої сторони або згори. Дозволяється позиційне позначення проставляти у середині прямокутника УГЗ;
- на схемі рекомендується вказувати технічні характеристики функціональних частин (біля графічного позначення або на вільній ділянці схеми);
- при вказівці біля УГП номіналів резисторів допускається застосовувати спрощений спосіб позначення одиниць величин, наприклад від 0 до 999 Ом величини одиниць не проставляються.

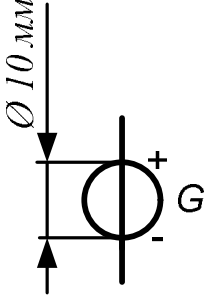
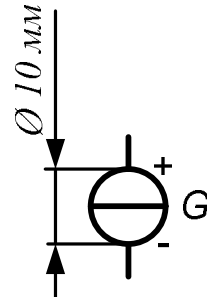
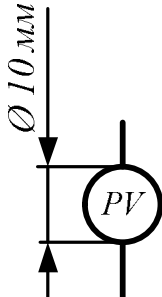
1.1 Загальні вимоги до виконання електричних схем

1. Відстань між сусідніми паралельними лініями зв'язку не повинно бути менше 3,0 мм. Відстань між окремими УГЗ повинно бути не менше 2,0 мм згідно з ГОСТ 2.701-84.
2. Усі розміри графічних зображень дозволяється пропорційно змінювати.
3. *Лінії зв'язку* виконують товщиною від 0,2 до 1,0 мм в залежності від форматів схеми та розмірів графічних позначень. Рекомендована товщина лінії від 0,3 до 0,4 мм.
4. Графічні зображення на схемах необхідно виконувати тієї ж товщиною, що і лінії зв'язку згідно з ГОСТ 2.728-74.
5. УГЗ елементів представляють на схемі в положенні, в якому вони приведені у відповідних стандартах, або оберненими на кут, кратний 90° , якщо у відповідних стандартах відсутні спеціальні вказівки.

У табл. 1 наведено умовні графічні зображення електричних елементів та їх найменування.

Таблиця 1 – Умовні графічні позначення елементів електричної схеми

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
1	Лінія електричного зв'язку із двома відгалуженнями, які дозволяють зображувати під кутами, що кратні 45° згідно з ГОСТ 2.721-74	
2	Напрямок енергетичного потоку (сигнал електричний в одному напрямку) згідно з ГОСТ 2.721-74	
3	Контакт роз'ємного з'єднання згідно з ГОСТ 2.755-87	
4	Резистор постійний згідно з ГОСТ 2.728-74	
5	Електричне з'єднання з корпусом згідно з ГОСТ 2.721-74	
6	Контакт розбірного з'єднання згідно з ГОСТ 2.755-87	

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
7	Ідеальне джерело напруги [ГОСТ 2.721-74, ІЕС 617-2:1996]	
8	Ідеальне джерело струму [ГОСТ 2.721-74, ІЕС 617-2:1996]	
9	Прилад електровимірювальний згідно з ГОСТ 2.747-68 Літерно-цифрове позначення вольтметра на електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710-81	

Оформлюючи РГР необхідно дотримуватись загальних вимог та правил у сфері науки й техніки відповідно до ДСТУ 3008:2015:

- звіт друкують шрифтом *Times New Roman* чорного кольору прямого накреслення через півтора-два міжрядкові інтервали кеглем 14;
- розмір шрифту для написання заголовків у рядках та колонках таблиць і пояснювальних даних на рисунках і в таблицях встановлює виконавець звіту;

- звіт як паперовий документ друкують з використанням комп'ютера та принтера на одному боці аркуша білого паперу формату А4 (210 мм х 297 мм). Рекомендовано на сторінках звіту використовувати береги такої ширини: верхній і нижній — не менше ніж 20 мм, лівий — не менше ніж 25 мм, правий — не менше ніж 10 мм;
- для розділів і підрозділів наявність заголовка обов'язкова. Пункти та підпункти можуть мати заголовки. Заголовки структурних елементів звіту та заголовки розділів треба друкувати з абзацного відступу великими літерами напівжирним шрифтом без крапки в кінці. Дозволено їх розміщувати посередині рядка;
- заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів звіту потрібно друкувати з абзацного відступу з великої літери без крапки в кінці. Абзацний відступ має бути однаковий упродовж усього тексту звіту й дорівнювати п'яти знакам. Якщо заголовок складається з кількох речень, їх розділяють крапкою. Розривати слова знаком переносу в заголовках заборонено. Відстань між заголовком, приміткою, прикладом і подальшим або попереднім текстом має бути не менше ніж два міжрядкових інтервали. Відстань між основами рядків заголовка, а також між двома заголовками приймають такою, як у тексті звіту;
- усі графічні матеріали звіту (діаграми, графіки, схеми, рисунки) повинні мати однаковий підпис «Рисунок». Рисунки нумерують наскрізно арабськими цифрами, крім рисунків у додатках. Дозволено рисунки нумерувати в межах кожного розділу. Назва рисунка має відображати його зміст, бути конкретною та стислою. За потреби пояснювальні дані до рисунка подають безпосередньо після графічного матеріалу перед назвою рисунка. Назву рисунка друкують з великої літери та розміщують під ним посередині рядка, наприклад, «Рисунок 2.1 — Схема устаткування»;

- формули та рівняння подають посередині сторінки симетрично тексту окремим рядком безпосередньо після тексту, у якому їх згадано. Найвище та найнижче розташування запису формул(и) має бути на відстані не менше ніж один рядок від попереднього й наступного тексту. Нумерують лише ті формули, на які є посилання в тексті звіту чи додатка. Формули у звіті, крім рівнянь у додатках, треба нумерувати наскрізно арабськими цифрами. Дозволено їх нумерувати в межах кожного розділу. Номер формули чи рівняння друкують на їх рівні праворуч у крайньому положенні в круглих дужках, наприклад (3). У багаторядкових формулах або рівняннях їхній номер проставляють на рівні останнього рядка;
- посилаючись на позицію переліку, треба зазначити номер структурного елемента звіту та номер позиції переліку з круглою дужкою, відокремлені комою. Посилання на джерело інформації, наведене в переліку джерел посилання, рекомендовано подавати так: номер у квадратних дужках, за яким це джерело зазначено в переліку джерел посилання, наприклад, «у роботах [2]— [3]».

2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Закон Ома встановлює зв'язок між напругою та струмом у будь-якій вітці електричного кола

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{j=1}^m R_j}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; n, m \in N, \quad (1)$$

де φ_1 та φ_2 – значення потенціалів вузлів 1 та 2, між якими знаходиться відповідна вітка, В;

E – значення ЕРС джерела напруги, що знаходиться у відповідній вітці,

B;

R – опір вітки, Ом.

Зв'язок між напругою та струмами у різних вітках кола встановлюється законами Кірхгофа [7]. Згідно з I законом Кірхгофа *алгебраїчна сума струмів у вітках, які приєднані до загального вузла, дорівнює нулю*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0; \quad k = \overline{1, n}; \quad n \in N. \quad (2)$$

Кількість рівнянь за I законом Кірхгофа для складного електричного кола визначається як

$$n_I = n_{\text{вузлів}} - 1, \quad (3)$$

де $n_{\text{вузлів}}$ – кількість вузлів, які мають різні значення потенціалів, шт.

Відповідно до II закону Кірхгофа, *алгебраїчна сума напруг всіх віток, що утворюють замкнутий контур, дорівнює нулю*

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0; \quad k = \overline{1, m}; \quad m \in N. \quad (4)$$

Кількість взаємонезалежних рівнянь, що складаються за II законом Кірхгофа визначається за наступною формулою

$$n_{II} = n_{\text{віток}} - n_I - n_J, \quad (5)$$

де $n_{\text{віток}}$ – кількість віток в електричному колі, шт;

n_J – кількість віток, що мають джерела струму, шт.

E_{km} – контурна ЕРС, В.

Напруга $R_{mn}I_{kn}$ на власних опорах контуру є завжди додатною, а на взаємних $R_{mn}I_{kn}$ може мати різну полярність, а саме:

- якщо напрямок контурних струмів I_{kn} у загальній вітці співпадає, то напруга додатна;
- якщо контурні струми протікають через взаємний опір у різних напрямках (на зустріч один одному), то - від'ємна.

Контурна ЕРС E_{km} дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС віток. Зі знаком "+" враховується ЕРС, коли її напрямок та контурного струму співпадають, а зі знаком – "-" якщо їх напрямки є протилежними [8].

2.2 Метод вузлових потенціалів

Метод вузлових потенціалів раціонально застосовувати, коли кількість потенціальних вузлів електричного кола менша або дорівнює кількості незалежних контурів.

Послідовність дій під час застосування методу вузлових потенціалів є наступною:

1) прирівняти до нуля потенціал одного із вузлів електричної схеми. Якщо у колі між двома вузлами увімкнено ідеальне джерело ЕРС, а опір відсутній, зручніше заземлити один з його затискачів, тоді потенціал другого вузла буде дорівнювати значенню ЕРС цього джерела;

2) визначити власну провідність вузлів, взаємні провідності між вузлами та вузлові струми. Для кожного потенціального вузла записати рівняння за I законом Кірхгофа. Слід врахувати, що у лівій частині рівняння добуток власної провідності вузла на його потенціал має знак "+", а добуток взаємної провідності на потенціал вузла – знак "-". Якщо вузол, що

розглядається, не зв'язаний вітками з будь-яким іншим вузлом, то взаємна провідність дорівнює нулю.

Система рівнянь за методом вузлових потенціалів має наступний вигляд

[illegible]

де G_{mn} – власний провідність потенціального вузла ($m=n$), См;

φ_n – потенціал вузла, В;

G_{mn} – взаємна провідність між потенціальними вузлами ($m \neq n$), См;

 J_{Bn} – вузловий струм, А;

- 3) визначити потенціали вузлів, вирішуючи отриману систему рівнянь;
- 4) визначити струми у вітках за законом Ома. Сила струму у вітці з ідеальним джерелом ЕРС визначається за I законом Кірхгофа.

2.3 Метод еквівалентного генератора

Для визначення сили струму в одній вітці складного електричного кола доцільно використовувати метод еквівалентного генератора ЕРС, який заснований на теоремі про активний двополіусник Тевенена.

Шуканий струм I у заданій вітці не зміниться (рис. 1,а), якщо активний двополюсник (A) до якого приєднана ця вітка, замінити (рис. 1,б) на джерело ЕРС, значення якого дорівнює напрузі неробочого ходу на клеммах розімкненої вітки, а його внутрішній опір дорівнює опору пасивного коло відносно клем заданої вітки.

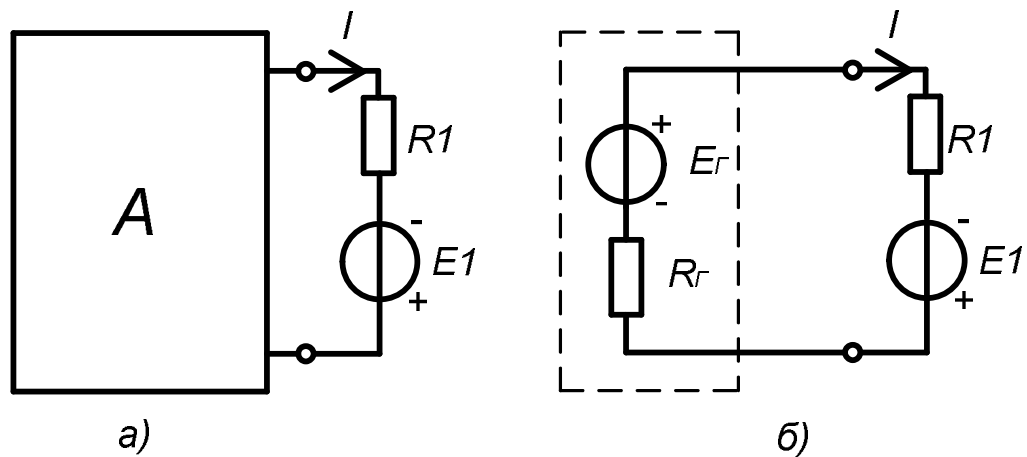


Рисунок 1 – Активний двополюсник з навантаженням

Визначення сили струму у заданій вітці електричного кола зручно виконувати за наступною послідовністю:

- 1) вилучити вітку, в якій потрібно знайти напрямок та значення сили струму;
- 2) визначити напругу неробочого ходу $U_{\text{нх}}$ активного двополюсника відносно заданої вітки;
- 3) знайти вхідний опір пасивного двополюсника $R_{\text{вх}}$ відносно вузлів заданої вітки, замінивши джерела енергії їх внутрішніми опорами. $R_{\text{вх}}$ буде дорівнювати опорі еквівалентного генератора R_{Γ} ;
- 4) розрахувати величину сили струму заданої вітки за законом Кірхгофа

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{нх}} \pm E_1}{R_{\Gamma} + R_1}. \quad (8)$$

де R_1 – опір заданої вітки, Ом;

E_1 – значення ЕРС заданої вітки, В.

У формулі (8) знак "+" ставиться коли напрямки дії складовими E_T та E_1 , ЕРС співпадають та "-" – коли напрямки ЕРС протилежні.

3 Потенціальна діаграма

Графік розподілу потенціалу вздовж контуру (рис. 2) називається *потенціальною діаграмою*. Вона допомагає знайти напругу між будь-якими двома точками контуру та напрямок струму на ділянці контуру.

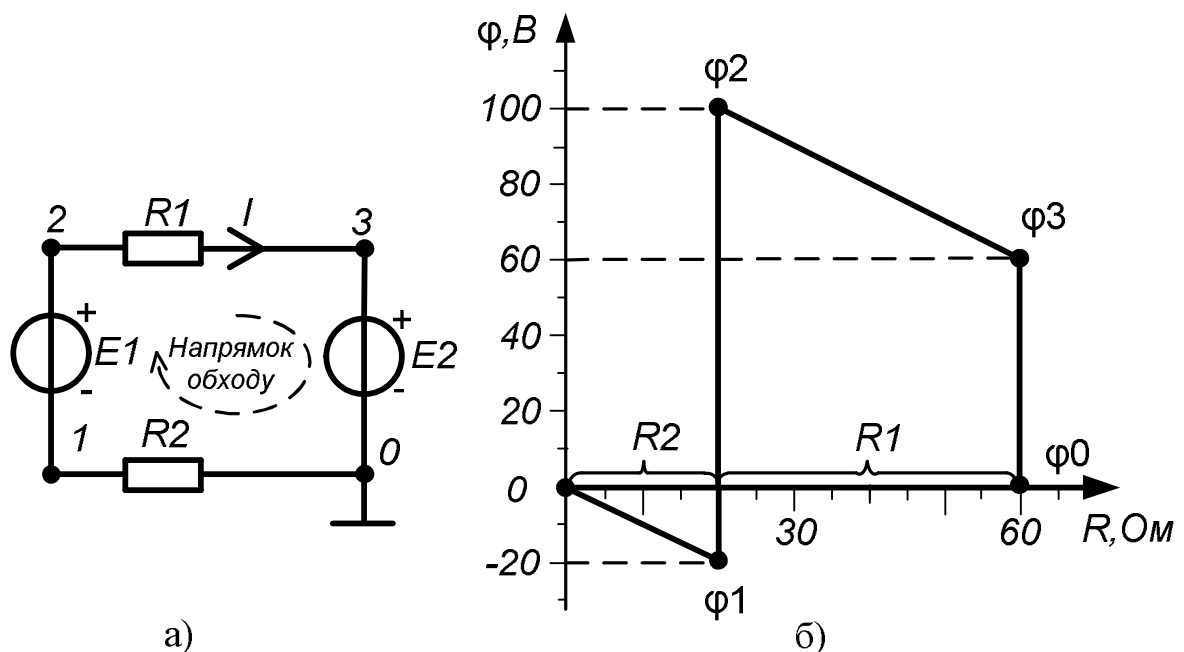


Рисунок 2 – Електричне коло (а) та його потенціальна діаграма (б)

Побудова діаграми починається з будь-якої точки контуру, потенціал якої прирівнюється до нуля. Напрямок обходу контуру вибирається довільно. По осі абсцис відкладають величини опорів резисторів віток, згідно з масштабом, а по осі ординат – потенціали відповідних точок контуру.

Для контуру (рис. 2,а) побудовано потенціальну діаграму (рис. 2,б), якщо $E_1 = 120(\text{В})$, $E_2 = 60(\text{В})$, $R_1 = 40(\text{Ом})$ та $R_2 = 20(\text{Ом})$. Джерела ЕРС не мають внутрішній опору. Напрямок обходу контуру вибираємо за годинниковою стрілкою та прирівнюємо потенціал точки «0» ϕ_0 до нуля (В).

Сила струму у шуканому контурі дорівнює $I = (E_1 - E_2)/(R_1 + R_2) = (120 - 60)/(20 + 40) = 1 \text{ (A)}$. Так як струм у контурі тече від більшого потенціалу до меншого, то потенціал точки «1» $\varphi_1 = \varphi_0 - I \cdot R_2 = 0 - 1 \cdot 20 = -20 \text{ (В)}$.

Потенціал точки «2» φ_2 більше потенціалу φ_1 на значення ЕРС E_1 (напрямок струму співпадає з напрямком дії ЕРС) та визначається за наступною формулою $\varphi_2 = \varphi_1 + E_1 = -20 + 120 = 100 \text{ (В)}$, потенціал точки «3» визначається аналогічно як і φ_1 та дорівнює $\varphi_3 = \varphi_2 - I \cdot R_1 = 100 - 1 \cdot 40 = 60 \text{ (В)}$.

4 Еквівалентні перетворення електричних кіл

Спрощення складного електричне кола можливе за рахунок еквівалентного перетворення окремих його частин. Воно призводить до зменшення кількості вузлів, віток та розрахункових рівнянь. Заміну декількох послідовно з'єднаних резисторів одним еквівалентним опором R_E зображено на рис. 3.

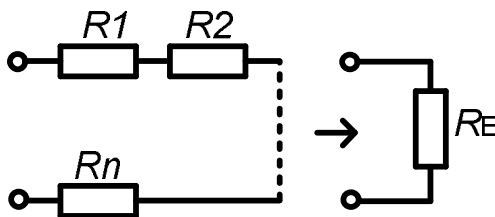


Рисунок 3 – Еквівалентне перетворення послідовно з'єднаних резисторів

Еквівалентний опір знаходиться як арифметична сума опорів послідовно з'єднаних резисторів

$$R_E = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (9)$$

де n – кількість елементів електричного кола, шт.

Перетворення декількох паралельно з'єднаних резисторів на один із еквівалентний опором R_E зображено на рис. 4.

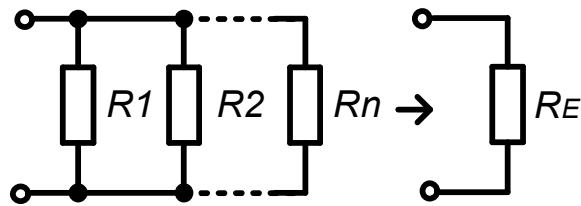


Рисунок 4 – Еквівалентне перетворення паралельно з'єднаних резисторів

При паралельному з'єднанні резисторів їх провідності арифметично додаються

$$G_E = \sum_{i=1}^n G_i = G_1 + G_2 + \dots + G_n, \quad R_E = \frac{1}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}. \quad (10)$$

Перехід від з'єднання резисторів трикутником до зірки представлено на рис. 5.

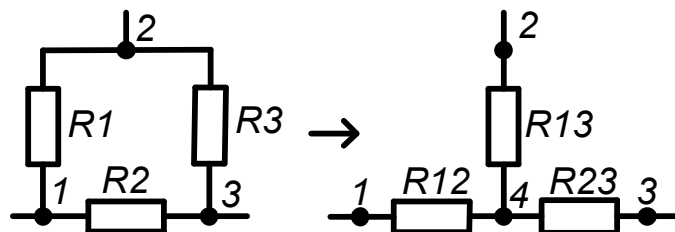


Рисунок 5 – Еквівалентне перетворення з'єднання резисторів трикутником на зірку

Еквівалентний опір променя зірки дорівнює добутку двох опорів віток трикутника резисторів, що приєднані до відповідного вузла через який

проходить промінь зірки, поділений на арифметичну суму усіх опорів трикутника:

$$\begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \\ R_{13} &= \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \\ R_{23} &= \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}. \end{aligned} \quad (11)$$

Заміну з'єднання резисторів зіркою на трикутник наведено на рис. 6.

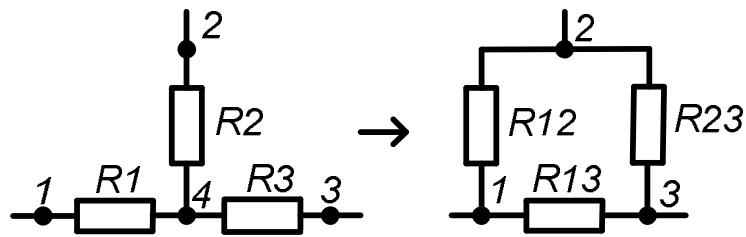


Рисунок 6 – Еквівалентне перетворення з'єднання резисторів зіркою на трикутник

Еквівалентний опір вітки трикутника резисторів дорівнює арифметичній сумі опорів променів зірки, що проходять через вузли між якими буде розташований шуканий опір резистора, та їхнього добутку поділеного на опір остатнього променя зірки:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \\ R_{13} &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}. \end{aligned} \quad (12)$$

5 ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Для дослідження лінійного електричного кола постійного струму потрібно:

1 Розрахувати струми у всіх вітках заданої схеми методом контурних струмів.

1.1. Перевірити достовірність розрахунку електричного кола за балансом потужностей та законами Кірхгофа. Для вузлів та незалежних контурів скласти відповідні лінійні рівняння.

2. Розрахувати струми у всіх вітках електричного кола методом вузлових потенціалів.

2.1 Побудувати потенціальну діаграму для замкнутого контуру, в якому діють обидва ідеальні джерела ЕРС G_1, G_2 зі значенням E_1 та E_2 .

2.2 Розрахувати покази вольтметра PV з урахуванням полярності підключення приладу.

3 Розрахувати силу струму у вітці з джерелом напруги GI методом еквівалентного генератора.

Електричні схеми відповідно до варіанту завдання представлені на рис. 7, а параметри елементів складного електричного кола постійного струму (значення опорів резисторів R , значення джерел ЕРС G_1, G_2 та величина J джерела струму G_3) наведені у табл. 1 та 2.

Варіант завдання складається з трьох цифр. Перша цифра відповідає номеру колонки табл. 2, друга – номеру колонки табл. 3, третя – номеру схеми на рис. 7.

Таблиця 2 – Значення параметрів ідеальних джерел енергії

Символьне позначення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
E_1 , (В)	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
E_2 , (В)	50	100	150	200	250	300	250	200	150	100
J , (А)	5	10	15	20	25	30	25	20	15	10

Таблиця 3 – Значення параметрів резисторів

Символьне позначення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R_1 , (Ом)	10	15	20	25	30	55	60	45	40	35
R_2 , (Ом)	15	20	25	30	35	50	55	40	35	30
R_3 , (Ом)	20	25	30	35	40	45	40	35	30	25
R_4 , (Ом)	25	30	35	40	45	40	35	30	25	20
R_5 , (Ом)	30	35	40	45	50	35	30	25	20	15
R_6 , (Ом)	35	40	45	50	55	30	25	20	15	10

УВАГА!

Електричні схеми з параметрами елементів повинні бути представлені відповідно до правил ЄСКД та ДСТУ, а під час оформлення рівнянь необхідно дотримуватись заданого порядку, а саме:

- формула у літерних позначеннях;
- формула у числах;
- відповідь;
- одиниці виміру.

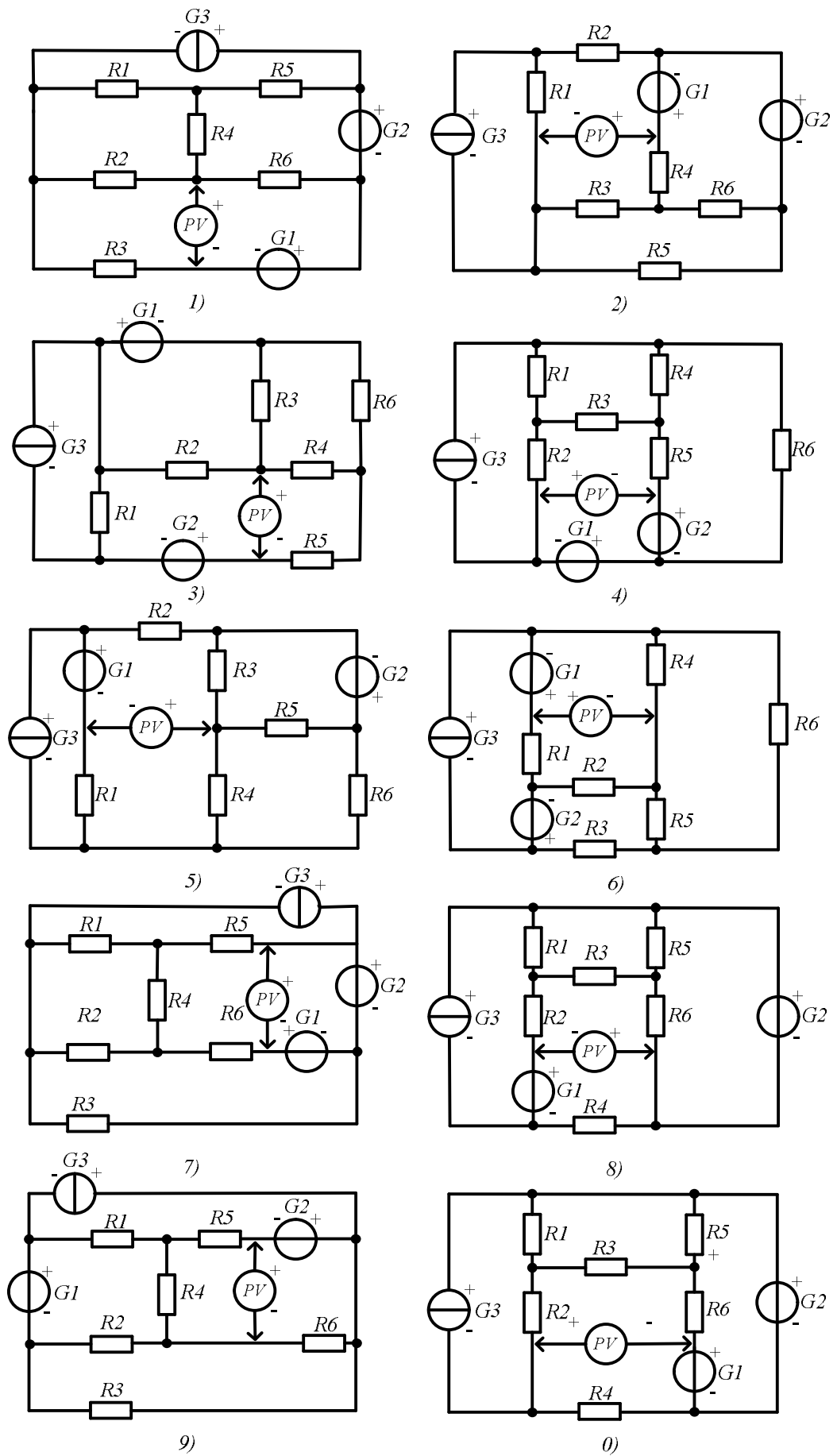


Рисунок 7 – Складні лінійні електричні кола постійного струму

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін. // Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с.: іл.
2. ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. – Чинний від 01.01. 1996. – Київ: Держстандарт України, 1995 – 68 с.
3. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. Изд. 4-е переработанное / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М., «Энергия», 1975. – 752 с. ил.
4. Курило І.А. Розрахунок електричних кіл постійного струму: для студентів електротехнічних напрямів підготовки 0906 “Електротехніка”, 0914 “Електроніка”, 0914 “Компютеризовані системи, автоматика і управління”, 0915 “Компютерна інженерія”. / І. А. Курило, І. Н. Намацалюк, А. А. Щерба. - К.: НТУУ”КПІ”, 2006. – 51 с.
5. Щерба А.А. Електричні кола постійного струму: Метод. вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Електротехніка» для студентів неелектричних напрямів підготовки / Уклад.: А.А.Щерба, Л.Ю. Спінул, О.М. Скринник-Київ.: НТУУ”КПІ”, 2010. – 29 с.
6. Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник / С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.
7. Лосев А.К. Линейные радиотехнические цепи. Учебник для радиотехн. специальностей вузов. М., «Высш. Школа», 1971 560 с.
8. Шебес М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах / М.Р. Шебес // Учебное пособие для электротехнич. и радиотехнич. специальностей вузов. – М.: «Высшая школа», 1973. – 656 с.

ДОДАТОК А

ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

РОЗРАХУНКОВА-ГРАФІЧНА РОБОТА

з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки - 1"

на тему: "ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ"

Варіант № 111

Виконав студент групи ЕП - 81 Іванов І.І.

(підпис)

Перевірив

(підпис)

КИЇВ – 20__ р.

ЗМІСТ

стор.

Завдання на самостійну роботу.....	30
1 Розрахунок струмів складного електричного кола методом контурних струмів.....	31
1.1 Перевірка достовірності розрахунку електричного кола за балансом потужностей та законами Кірхгофа.....	34
2 Розрахунок струмів складного електричного кола методом вузлових потенціалів.....	35
2.1 Визначення показу вольтметра.....	39
2.2 Потенціальна діаграма замкнутого контуру.....	40
3 Розрахунок сили струму у вітці з джерелом ЕРС E_l методом еквівалентного генератора.....	41
Висновки.....	46
Список використаної літератури.....	46

ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ

Згідно варіанта № 111 розрахунково-графічної роботи вибираємо електричне схему №1, яка представлена на рис. 7 [].

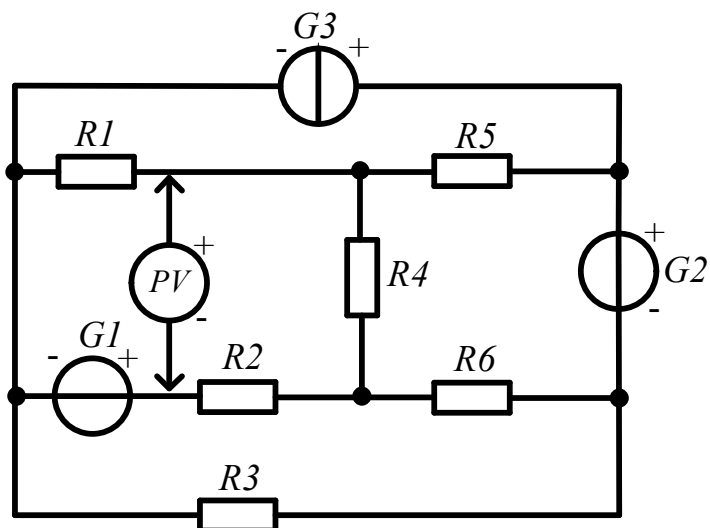


Рисунок А.1 – Планарне електричне коло постійного струму

Параметри для електричного кола наведені в табл. 2 та 3 []:

$$E_1=125 \text{ (В)};$$

$$E_2=50 \text{ (В)};$$

$$J=5 \text{ (А)};$$

$$R_1=10 \text{ (Ом)};$$

$$R_2=15 \text{ (Ом)};$$

$$R_3=20 \text{ (Ом)};$$

$$R_4=25 \text{ (Ом)};$$

$$R_5=30 \text{ (Ом)};$$

$$R_6=35 \text{ (Ом)}.$$

1 Розрахунок струмів складного електричного кола методом контурних струмів

Обрану електричну схему з параметрами її елементів зображуємо відповідно до правил ЄСКД та ДСТУ на рис. А.2.

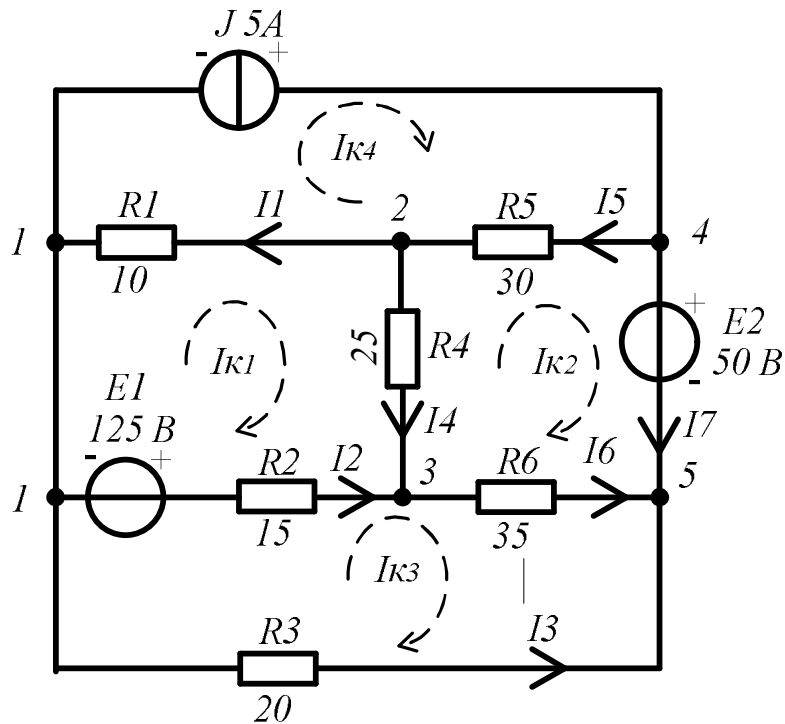


Рисунок А.2 – Схема електричного кола постійного струму

Складне електричне коло (рис. А.2) має чотири незалежні контури (по яких протікають I_{K1} , I_{K2} , I_{K3} та I_{K4}). Напрямок струмів у вітках $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ та I_7 вибираємо довільно. Значення контурного струму I_{K4} та його напрямок співпадає зі значенням ідеального джерела струму $I_{K4} = J = 5 \text{ A}$.

Складаємо систему рівнянь з трьома невідомими за другим законом Кірхгофа (6) у відповідності з []

$$\begin{cases} R_{11}I_{K1} + R_{12}I_{K2} + R_{13}I_{K3} + R_{14}I_{K4} = E_{K1}; \\ R_{21}I_{K1} + R_{22}I_{K2} + R_{23}I_{K3} + R_{24}I_{K4} = E_{K2}; \\ R_{31}I_{K1} + R_{32}I_{K2} + R_{33}I_{K3} + R_{34}I_{K4} = E_{K3}. \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Знаходимо власні опори незалежних контурів, як арифметичну суму опорів контуру:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_2 + R_4 = 10 + 15 + 25 = 50(\text{Ом}); \\ R_{22} &= R_4 + R_5 + R_6 = 25 + 30 + 35 = 90(\text{Ом}); \\ R_{33} &= R_2 + R_3 + R_6 = 15 + 20 + 35 = 70(\text{Ом}). \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Взаємні контурні опори віток при протилежних напрямках обтікання спільної вітки контурними струмами від'ємні:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_{21} = -R_4 = -25(\text{Ом}); \\ R_{23} &= R_{32} = -R_6 = -35(\text{Ом}); \\ R_{31} &= R_{13} = -R_2 = -15(\text{Ом}); \\ R_{14} &= -R_1 = -10(\text{Ом}); \\ R_{24} &= -R_5 = -30(\text{Ом}). \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Контурні ЕРС дорівнюють алгебраїчній сумі значень ЕРС окремих віток відповідного контуру:

$$\begin{aligned} E_{K1} &= -E_1 = -125(\text{В}); \\ E_{K2} &= -E_2 = -50(\text{В}); \\ E_{K3} &= E_1 = 125(\text{В}). \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Підставляємо величини опорів та ЕРС (A.2 - A.4) до системи рівнянь (A.1)

$$\begin{cases} 50I_{K1} - 25I_{K2} - 15I_{K3} - 10 \cdot 5 = -125; \\ -25I_{K1} + 90I_{K2} - 35I_{K3} - 30 \cdot 5 = -50; \\ -15I_{K1} - 35I_{K2} + 70I_{K3} + 0 \cdot 5 = 125. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 50I_{K1} - 25I_{K2} - 15I_{K3} = -75; \\ -25I_{K1} + 90I_{K2} - 35I_{K3} = 100; \\ -15I_{K1} - 35I_{K2} + 70I_{K3} = 125. \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Знаходимо контурні струми електричної схеми за допомогою визначників:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 50 & -25 & -15 \\ -25 & 90 & -35 \\ -15 & -35 & 70 \end{vmatrix} = 50(90 \cdot 70 - 35 \cdot 35) + 25(-25 \cdot 70 - 15 \cdot 35) +$$

$$-15(25 \cdot 35 + 15 \cdot 90) = 253800 - 56880 - 33370 = 163500;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -75 & -25 & -15 \\ 100 & 90 & -35 \\ 125 & -35 & 70 \end{vmatrix} = -75(90 \cdot 70 - 35 \cdot 35) + 25(100 \cdot 70 + 125 \cdot 35) +$$

$$-15(100(-35) - 125 \cdot 90) = -380600 + 284400 + 221200 = 125000;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 50 & -75 & -15 \\ -25 & 100 & -35 \\ -15 & 125 & 70 \end{vmatrix} = 50(100 \cdot 70 + 125 \cdot 35) + 75(-25 \cdot 70 - 15 \cdot 35) +$$

$$-15(-25 \cdot 125 + 15 \cdot 100) = 568800 - 170600 + 24380 = 422500;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 50 & -25 & -75 \\ -25 & 90 & 100 \\ -15 & -35 & 125 \end{vmatrix} = 50(90 \cdot 125 + 35 \cdot 100) + 25(-25 \cdot 125 + 15 \cdot 100) +$$

$$-75(25 \cdot 35 + 15 \cdot 90) = 737500 - 40630 - 166900 = 530000.$$

Оскільки визначник $\Delta \neq 0$, то система (А.5) має єдине рішення, і за формулами Крамера визначаємо контурні струми:

$$I_{K1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{125000}{163500} = 0.765(\text{A});$$

$$I_{K2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{422500}{163500} = 2.584(\text{A});$$

$$I_{K3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{530000}{163500} = 3.242(\text{A}).$$

Знайдемо напрямки та силу струмів віток, які дорівнюють алгебраїчній сумі контурних струмів:

$$\begin{aligned}I_1 &= J - I_{K1} = 5 - 0.765 = 4.235(\text{A}); \\I_2 &= I_{K3} - I_{K1} = 3.242 - 0.765 = 2.477(\text{A}); \\I_3 &= -I_{K3} = -3.242(\text{A}); \\I_4 &= I_{K1} - I_{K2} = 0.765 - 2.584 = -1.82(\text{A}); \\I_5 &= J - I_{K2} = 5 - 2.584 = 2.416(\text{A}); \\I_6 &= I_{K3} - I_{K2} = 3.242 - 2.584 = 0.657(\text{A}); \\I_7 &= I_{K2} = 2.584(\text{A}).\end{aligned}$$

Від'ємне значення струмів I_3 та I_4 свідчить про протилежний напрямок протікання струмів у вітках відносно вибраних, що зображені на рис. А.2.

1.1 Перевірка достовірності розрахунку електричного кола за балансом потужностей та законами Кірхгофа

Активна потужність джерел енергії $P_{\text{дж}}$ та споживачів $P_{\text{сп}}$ дорівнює:

$$\begin{aligned}P_{\text{дж}} &= J \cdot U_{41} + E_1 \cdot I_2 - E_2 \cdot I_7 = J(R_1 \cdot I_1 + R_5 \cdot I_5) + E_1 \cdot I_2 - E_2 \cdot I_7 = \\&= 5 \cdot (10 \cdot 4.235 + 30 \cdot 2.416) + 125 \cdot 2.447 - 50 \cdot 2.584 = \\&= 574.159 + 309.633 - 129.205 = 754.587(\text{Вт}).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{\text{сп}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 = \\&= 4.235^2 \cdot 10 + 2.477^2 \cdot 15 + (-3.242)^2 \cdot 20 + (-1.82)^2 \cdot 25 + \\&+ 2.416^2 \cdot 30 + 2.584^2 \cdot 35 = \\&= 179.392 + 92.038 + 210.158 + 82.771 + 175.097 + 15.13 = 754.587(\text{Вт}).\end{aligned}$$

Складемо незалежні рівняння за I законом Кірхгофа для кожного вузла:

$$\text{1-й вузол } I_1 - I_2 - I_3 - J = 4.235 - 2.477 + 3.242 - 5 = 0(\text{A});$$

$$\text{2-й вузол } -I_1 - I_4 + I_5 = -4.235 + 1.82 + 2.416 = 0(\text{A});$$

$$\text{3-й вузол } I_2 + I_4 - I_6 = 2.477 - 1.82 - 0.657 = 0(\text{A});$$

$$\text{4-й вузол } -I_5 - I_7 + J = -2.416 - 2.584 + 5 = 0(\text{A}).$$

Складемо рівняння за II законом Кірхгофа для незалежних трьох контурів:

$$\begin{aligned} \text{1-й контур: } & -I_1 R_1 + I_4 R_4 - I_2 R_2 + E_1 = 0, \\ & -4.235 \cdot 10 - 1.82 \cdot 25 - 2.477 \cdot 15 + 125 = -42.355 - 45.489 - 37.156 + 125 = 0(\text{B}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2-й контур: } & -I_4 R_4 - I_5 R_5 - I_6 R_6 + E_2 = 0, \\ & 1.82 \cdot 25 - 2.416 \cdot 30 - 0.657 \cdot 35 + 50 = 45.489 - 72.477 - 23.012 + 50 = 0(\text{B}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{3-й контур: } & I_2 R_2 + I_6 R_6 - I_3 R_3 - E_1 = 0, \\ & 2.477 \cdot 15 + 0.657 \cdot 35 - 3.242 \cdot 20 - 125 = 37.156 + 23.012 + 64.832 - 125 = 0(\text{B}). \end{aligned}$$

Рівність активних потужностей джерел енергії $P_{\text{дж}}$ та споживачів $P_{\text{сп}}$, та виконання законів Кірхгофа вказує на правильність розв'язання системи рівнянь (А.5).

2 Розрахунок струмів складного електричного кола методом вузлових потенціалів

Зображене електричне кола на рис. А.3 має п'ять вузлів, що мають різні потенціали. Потенціал вузла φ_5 прирівнюємо до нуля ($\varphi_5 = 0(\text{В})$), тоді потенціал вузла $\varphi_4 = \varphi_5 + E_2 = 0 + 50 = 50$ (В) (в наслідок дії у вітці між вузлами 4 та 5 ідеального джерела ЕРС G_2 зі значенням E_2).

У колі залишаються невідомими потенціали вузлів 1, 2 та 3, тому кількість рівнянь системи дорівнює трьом. Напрямки дії сил струмів віток залишаємо такими як і на рис. А.2.

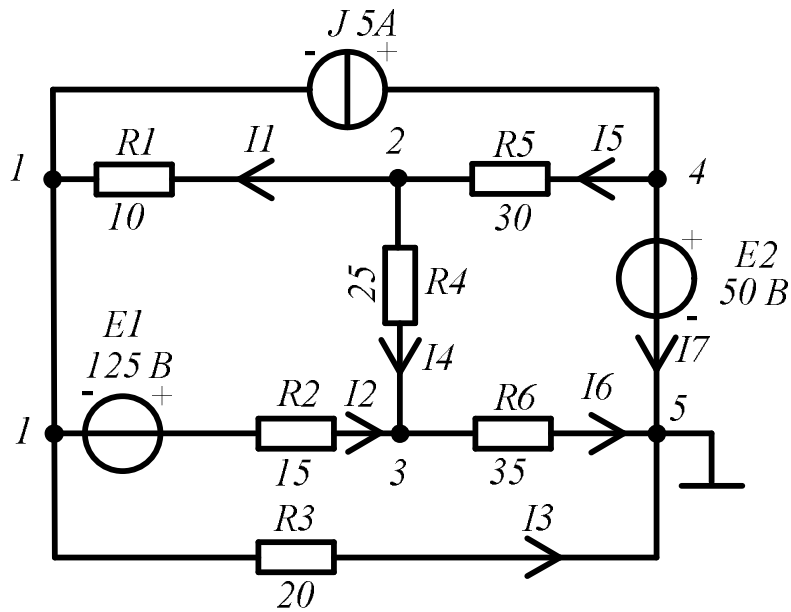


Рисунок А.3 – Схема лінійного електричного кола

Відповідно до (7) [], складемо систему лінійних рівнянь для вузлів, потенціали яких потрібно визначити

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 - G_{13}\varphi_3 - G_{14}\varphi_4 = J_{B1}; \\ -G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 - G_{23}\varphi_3 - G_{24}\varphi_4 = J_{B2}; \\ -G_{31}\varphi_1 - G_{32}\varphi_2 + G_{33}\varphi_3 - G_{34}\varphi_4 = J_{B3}. \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Знайдемо власні провідності вузлів, як арифметичну суму провідностей віток приєднаних до відповідного вузла:

$$\begin{aligned} G_{11} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} + \frac{1}{20} = 0.217 (\text{См}); \\ G_{22} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{10} + \frac{1}{25} + \frac{1}{30} = 0.173 (\text{См}); \\ G_{33} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{20} + \frac{1}{25} + \frac{1}{35} = 0.135 (\text{См}). \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Взаємні провідності між вузлами дорівнюють:

$$\begin{aligned}
G_{12} &= G_{21} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10} = 0.1(\text{См}); \\
G_{23} &= G_{32} = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{25} = 0.04(\text{См}); \\
G_{31} &= G_{13} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{15} = 0.067(\text{См}); \\
G_{14} &= 0(\text{См}); \\
G_{24} &= \frac{1}{R_5} = \frac{1}{30} = 0.033(\text{См}); \\
G_{34} &= 0(\text{См}).
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Вузлові струми визначаються за наступними формулами:

$$\begin{aligned}
J_{B1} &= J - E_1 G_{13} = 5 - 125 \cdot 0.067 = -13.333(\text{А}); \\
J_{B2} &= 0(\text{А}); \\
J_{B3} &= E_1 G_{13} = 125 \cdot 0.067 = 8.333(\text{А}).
\end{aligned} \tag{A.9}$$

Підставляємо величини провідностей та вузлових струмів (A.7 - A.9) до системи рівнянь (A.6)

$$\begin{cases} 0.2167\varphi_1 - 0.1\varphi_2 - 0.0667\varphi_3 - 0 \cdot \varphi_4 = -13.333; \\ -0.1\varphi_1 + 0.1733\varphi_2 - 0.04\varphi_3 - 0.033\varphi_4 = 0; \\ -0.0667\varphi_1 - 0.04\varphi_2 + 0.1352\varphi_3 - 0 \cdot \varphi_4 = 8.333; \end{cases} \Rightarrow \tag{A.7}$$

$$\begin{cases} 0.2167\varphi_1 - 0.1\varphi_2 - 0.0667\varphi_3 = -13.3333; \\ -0.1\varphi_1 + 0.1733\varphi_2 - 0.04\varphi_3 = 1.6667; \\ -0.0667\varphi_1 - 0.04\varphi_2 + 0.1352\varphi_3 = 8.3333. \end{cases}$$

Знайдемо величини потенціалів у вузлах 1, 2 та 3 за допомогою визначників:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0.2167 & -0.1 & -0.0667 \\ -0.1 & 0.1733 & -0.04 \\ -0.0667 & -0.04 & 0.1352 \end{vmatrix} = 0.2167(0.1733 \cdot 0.1352 - 0.04 \cdot 0.04) +$$

$$+ 0.1(-0.1 \cdot 0.1352 - 0.0667 \cdot 0.04) - 0.0667(0.1 \cdot 0.04 + 0.0667 \cdot 0.1733) =$$

$$= 4.731 \cdot 10^{-3} - 1.619 \cdot 10^{-3} - 1.038 \cdot 10^{-3} = 2.074 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -13.3333 & -0.1 & -0.0667 \\ 1.6667 & 0.1733 & -0.04 \\ 8.3333 & -0.04 & 0.1352 \end{vmatrix} = -13.3333(0.1733 \cdot 0.1352 - 0.04 \cdot 0.04) +$$

$$+ 0.1(1.6667 \cdot 0.1352 + 8.3333 \cdot 0.04) - 0.0667(1.6667(-0.04) - 8.3333 \cdot 0.1733) =$$

$$= -0.291 - 0.056 - 0.101 = -0.134;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0.2167 & -13.3333 & -0.0667 \\ -0.1 & 1.6667 & -0.04 \\ -0.0667 & 8.3333 & 0.1352 \end{vmatrix} = 0.2167(1.6667 \cdot 0.1352 + 8.3333 \cdot 0.04) +$$

$$+ 13.3333(-0.1 \cdot 0.1352 - 0.0667 \cdot 0.04) - 0.0667(-0.1 \cdot 8.3333 + 0.0667 \cdot 1.6667) =$$

$$= 0.121 - 0.216 + 0.048 = -0.047;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0.2167 & -0.1 & -13.3333 \\ -0.1 & 0.1733 & 1.6667 \\ -0.0667 & -0.04 & 8.3333 \end{vmatrix} = 0.2167(0.1733 \cdot 8.3333 + 0.04 \cdot 1.6667) +$$

$$+ 0.1(-0.1 \cdot 8.3333 + 0.0667 \cdot 1.6667) - 13.3333(0.1 \cdot 0.04 + 0.0667 \cdot 0.1733) =$$

$$= 0.327 - 0.072 - 0.207 = 0.048.$$

Система (А.7) має єдине рішення (визначник $\Delta \neq 0$). За формулами Крамера визначаємо потенціали відповідних вузлів:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-0.134}{2.074 \cdot 10^{-3}} = -64.832(\text{В});$$

$$\varphi_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-0.047}{2.074 \cdot 10^{-3}} = -22.477(\text{В});$$

$$\varphi_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{0.048}{2.074 \cdot 10^{-3}} = 23.012(\text{В}).$$

За законом Ома знайдемо струми у вітках:

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_1} = \frac{-22.477 - (-64.8332)}{10} = \frac{42.355}{10} = 4.235(\text{A});$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_1}{R_2} = \frac{-64.8332 - 23.012 + 125}{15} = \frac{37.156}{15} = 2.477(\text{A});$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_5}{R_3} = \frac{-64.833 - 0}{20} = -3.242(\text{A});$$

$$I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_4} = \frac{-22.477 - 23.012}{25} = \frac{-45.489}{25} = -1.82(\text{A});$$

$$I_5 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2}{R_5} = \frac{50 - (-22.477)}{30} = \frac{72.477}{30} = 2.416(\text{A});$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_5}{R_5} = \frac{23.012 - 0}{35} = 0.657(\text{A});$$

$$I_7 = J - I_5 = 5 - 2.416 = 2.584(\text{A}).$$

Від'ємне значення струмів I_3 та I_4 свідчить про протилежний напрямок протікання струмів у вітках відносно вибраних, що зображені на рис. А.3.

2.1 Визначення показу вольтметра

Згідно заданого варіанта розрахунково-графічної роботи вольтметр PV підключено, як зображено на рис. А.4. Знаходимо потенціал точки "а"

$$\varphi_a = \varphi_3 + I_2 R_6 = 23.012 = 2.477 \cdot 15 = 23.012 + 37.156 = 60.168(\text{В}).$$

Величина наруги, яку вимірює вольтметр PV згідно зі схемою підключення, дорівнює

$$U_{PV} = \varphi_2 - \varphi_a = -22.477 - 60.168 = -82.645(\text{В}).$$

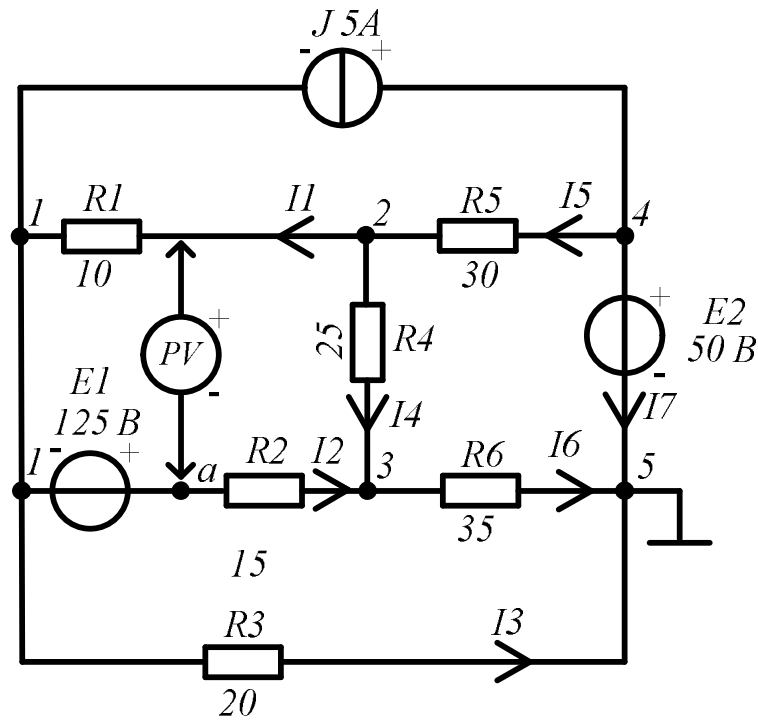


Рисунок А.4 – Схема підключення вольтметра

2.2 Потенціальна діаграма замкнутого контуру

Потенціальну діаграму для замкнутого контуру (шлях обходу за вузлами 5-4-2-1-3-5 рис. А.4), в якому діють обидва ідеальні джерела з ЕРС $E_1 = 125(\text{В})$ та $E_2 = 50(\text{В})$, представлено на рис. А.5.

Величини потенціалів вузлів 1, 2, 3, 4, 5 та точки "а" визначені вище у розділі 2 та дорівнюють:

$$\varphi_1 = -64.832(\text{В});$$

$$\varphi_2 = -22.477(\text{В});$$

$$\varphi_3 = 23.012(\text{В});$$

$$\varphi_4 = 50(\text{В});$$

$$\varphi_5 = 0(\text{В});$$

$$\varphi_a = -60.168(\text{В}).$$

Обхід указанного контуру проходить через вітки з резисторами, величини опорів яких дорівнюють: $R_5 = 30(\text{Ом})$, $R_1 = 10(\text{Ом})$, $R_2 = 15(\text{Ом})$, $R_6 = 35(\text{Ом})$.

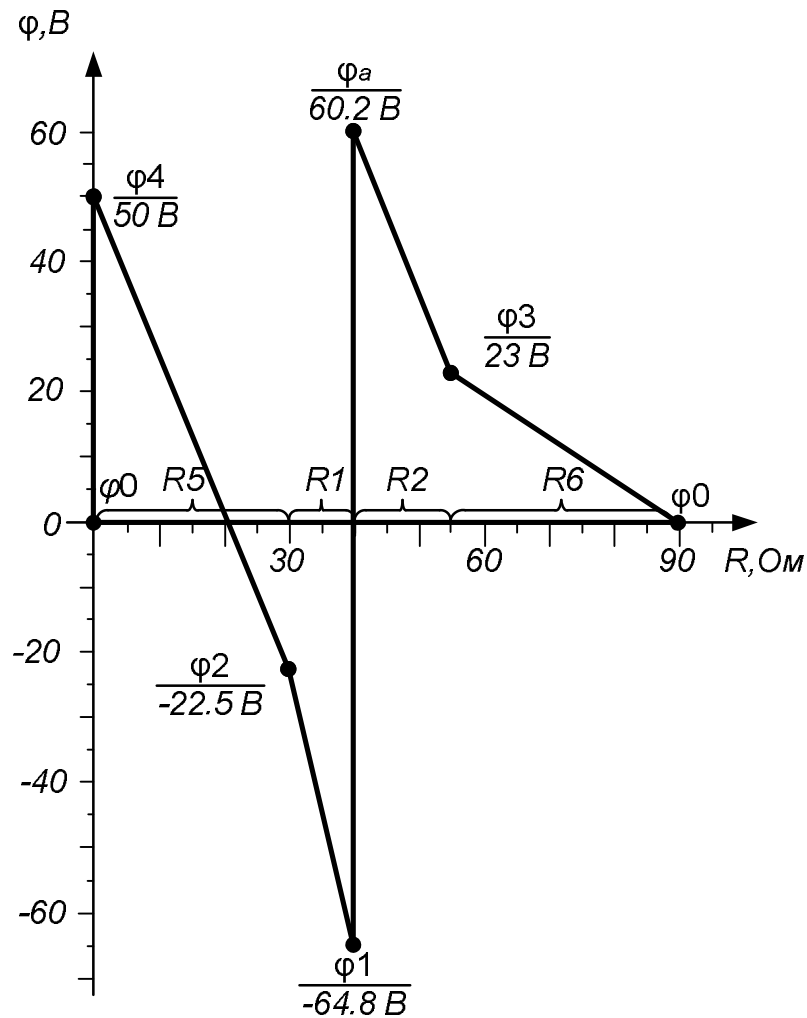


Рисунок А.5 – Потенціальна діаграма замкнутого контуру

3 Розрахунок сили струму у вітці з джерелом ЕРС E_I методом еквівалентного генератора

Для знаходження сили струму у вітці між вузлами 1 та 3 необхідно визначити струми у активному двополюснику з вихідними затискачами 1 та 3, який зображено на рис. А.6.

Визначимо напругу неробочого ходу $U_{\text{НХ13}}$ методом контурних струмів. Складне електричне коло має три незалежні контури. Напрямок та значення контурного струму $I_{\text{к3}}$ співпадає зі значенням ідеального джерела струму $I_{\text{к3}} = J = 5(\text{А})$.

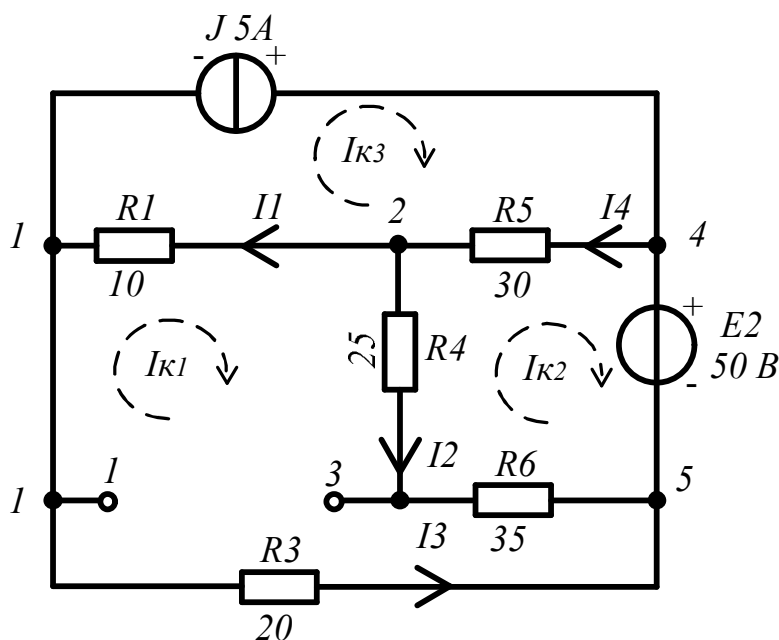


Рисунок А.6 – Електрична схема активного двополюсника

Тому складаємо систему з двох лінійних рівнянь за другим законом Кірхгофа

$$\begin{cases} R_{11}I_{K1} + R_{12}I_{K2} + R_{13}I_{K3} = E_{K1}; \\ R_{21}I_{K1} + R_{22}I_{K2} + R_{23}I_{K3} = E_{K2}. \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Знайдемо власні опори незалежних контурів, як арифметичну суму опорів контуру:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_3 + R_4 + R_6 = 10 + 20 + 25 + 35 = 90(\text{Ом}); \\ R_{22} &= R_4 + R_5 + R_6 = 25 + 30 + 35 = 90(\text{Ом}). \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Взаємні контурні опори мають від'ємне значення за різних напрямків протікання контурних струмів через загальну вітку:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_{21} = -R_4 - R_6 = -25 - 35 = -60(\text{Ом}); \\ R_{13} &= R_{31} = -R_1 = 10(\text{Ом}); \\ R_{23} &= R_{32} = -R_5 = -30(\text{Ом}). \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Контурна ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі значень ЕРС окремих віток відповідного контуру:

$$\begin{aligned} E_{K1} &= 0(\text{В}); \\ E_{K2} &= -E_2 = -20(\text{В}). \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Підставляємо величини опорів та ЕРС (А.9 - А.11) до системи рівнянь (А.8)

$$\begin{cases} 90I_{K1} - 60I_{K2} - 10 \cdot 5 = 0; \\ -60I_{K1} + 90I_{K2} - 30 \cdot 5 = -50. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 90I_{K1} - 60I_{K2} = 50; \\ -60I_{K1} + 90I_{K2} = 100. \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Знайдемо контурні струми активного двополюсника за допомогою визначників:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} 90 & -60 \\ -60 & 90 \end{vmatrix} = 90 \cdot 90 - (-60) \cdot (-60) = 8100 - 3600 = 4500; \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} 50 & -60 \\ 100 & 90 \end{vmatrix} = 50 \cdot 90 - 100 \cdot (-60) = 4500 + 6000 = 10500; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} 90 & 50 \\ -60 & 100 \end{vmatrix} = 90 \cdot 100 - (-60) \cdot (50) = 9000 + 3000 = 12000. \end{aligned}$$

Визначник $\Delta \neq 0$, то система (А.12) має єдине рішення. За формулами Крамера визначаємо контурні струми:

$$\begin{aligned} I_{K1} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{10500}{4500} = 2.333(\text{А}); \\ I_{K2} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{12000}{4500} = 2.667(\text{А}). \end{aligned}$$

Зайдемо струми віток як алгебраїчну суму контурних струмів:

$$I_1 = J - I_{K1} = 5 - 2.333 = 2.667(\text{A});$$

$$I_2 = I_{K1} - I_{K2} = 2.333 - 2.667 = -0.334(\text{A});$$

$$I_3 = -I_{K1} = -2.333(\text{A});$$

$$I_4 = J - I_{K2} = 5 - 2.667 = 2.333(\text{A}).$$

Від'ємне значення струмів I_2 та I_3 свідчить про протилежний напрямок протікання струмів у вітках відносно вибраних, що зображені на рис. А.6. Напряга неробочого ходу $U_{\text{НХ13}}$ дорівнює значенню ЕРС еквівалентного генератора та визначається за формулою

$$U_{\text{НХ13}} = E_{\Gamma} = I_2 R_4 - I_1 R_1 = -0.333 \cdot 25 - 2.667 \cdot 10 = -8.333 - 26.67 = -35(\text{В}).$$

Опір еквівалентного генератора R_{Γ} дорівнює опору пасивного двополюсника, полюсами якого є вузли 1 та 3. Відповідну перетворену електричну схему пасивного двополюсника представлено на рис. А.7.

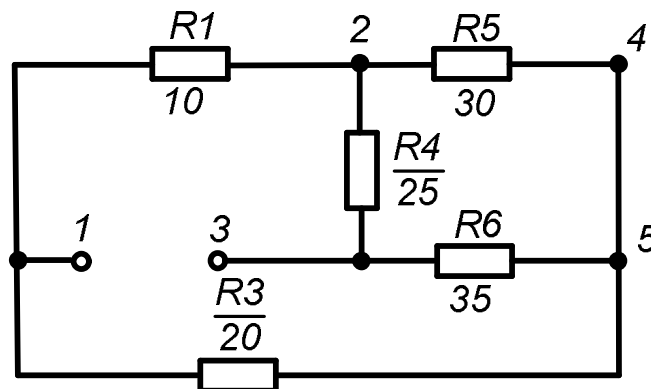


Рисунок А.7 – Електрична схема пасивного двополюсника

Застосуємо еквівалентне перетворення електричної схеми пасивного двополюсника (перетворення трикутника опорів, який складається з

резисторів R_4, R_5 та R_6 на зірку, що містить резистори R_{45}, R_{46} та R_{56}):

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{25 \cdot 30}{25 + 30 + 35} = \frac{750}{90} = 8.333 \text{ (Ом)};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{25 \cdot 35}{25 + 30 + 35} = \frac{875}{90} = 9.722 \text{ (Ом)};$$

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{30 \cdot 35}{25 + 30 + 35} = \frac{1050}{90} = 11.667 \text{ (Ом)}.$$

У результаті виконаних перетворень отримаємо електричне коло, яке зображено на рис. А.8.

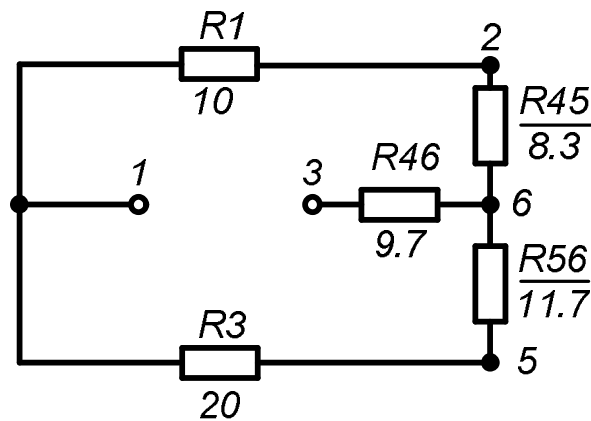


Рисунок А.8 – Еквівалентне перетворення електричної схеми пасивного двополюсника

Відповідно до рис. А.8 опір еквівалентного генератора дорівнює

$$R_{\Gamma} = \frac{(R_1 + R_{45})(R_3 + R_{56})}{(R_1 + R_{45}) + (R_3 + R_{56})} + R_{46} = \frac{(10 + 8.333)(20 + 11.667)}{(10 + 8.333) + (20 + 11.667)} + 9.722 =$$

$$= \frac{18.333 \cdot 31.667}{50} + 9.722 = \frac{580.556}{50} + 9.722 = 11.611 + 9.722 = 21.333 \text{ (Ом)}.$$

Остаточно, електричне коло з еквівалентним генератором та навантаженням (вітка між вузлами 1 та 3, яка містить ідеальне джерело ЕРС E_1 та резистор із значенням опору R_1) представлено рис. А.9.

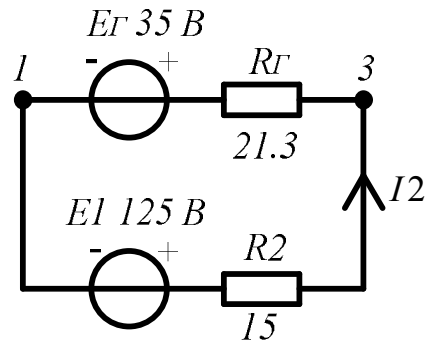


Рисунок А.9 – Електрична схема кола постійного струму

Сила струму I_2 відповідно до вибраного обходу за напрямком струму на рис. А.9 дорівнює

$$I_2 = \frac{E_1 + U_{\text{HX13}}}{R_\Gamma + R_2} = \frac{E_1 - E_\Gamma}{R_\Gamma + R_2} = \frac{125 - 35}{21.333 + 15} = \frac{90}{36.33} = 2.477 \text{ (A)}.$$

ВИСНОВКИ

Під час виконання розрахунково-графічній роботи засвоєно основні положення теорії лінійних кіл постійного струму та загальні правила зображення електричних схем згідно з ЄСКД та ДСТУ. Використано різні методи розрахунку складних кіл для знаходження струмів віток та потенціалів вузлів.

Визначено переваги та недоліки представлених методів, а саме...

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Чинний від 01.07. 2016. – Київ: Держстандарт України, 2015 – 16 с.