МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

"ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ"

Аналіз лінійних резистивних кіл постійного струму

для студентів спеціальностей 6.170101 – «Системи технічного захисту інформації», 6.160102 – «Безпека інформаційних і комунікаційних систем» усіх форм навчання

2007

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Основи теорії кіл. Аналіз лінійних резистивних кіл постійного струму" для студентів спеціальностей 6.170101 – "Системи технічного захисту інформації", 6.160102 – "Безпека інформаційних і комунікаційних систем" усіх форм навчання / Укл.: Л.М. Карпуков, А.О. Місюра. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2007. - 42 с.

Наведено основні методи розрахунку лінійних резистивних кіл постійного струму із застосуванням прикладних пакетів MathCAD та Electronics Workbench.

Укладачі: Л.М. Карпуков, професор, д. т. н.,
А.О. Місюра, ст. викладач, к. ф.-м. н.

Рецензент: С.М. Романенко, доцент, к. ф.-м. н.

Відповідальний
за випуск: А.О. Місюра, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри
захисту інформації
Протокол № 2 від 10.10.2007 р.

ЗМІСТ

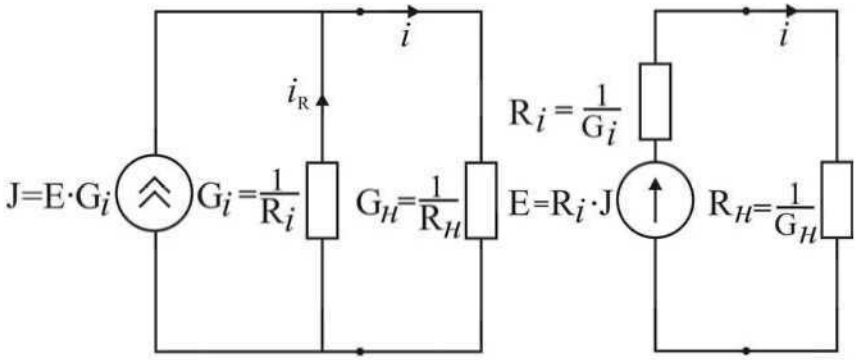
Лабораторна робота №1. Методи перетворення кіл..... 4
Лабораторна робота №2. Моделювання роботи електричного кола у середовищі Electronics Workbench (EWB)..... 11
Лабораторна робота №3. Розрахунок електричного кола методом струмів елементів..... 15
Лабораторна робота №4. Розрахунок електричного кола методом контурних струмів..... 21
Лабораторна робота №5. Розрахунок електричного кола методом вузлових потенціалів..... 26
Лабораторна робота №6. Розрахунок балансу потужностей та потенціальної діаграми електричного кола... 32
Перелік посилань..... 36
Додаток А. Елементи електричного кола..... 37
Додаток Б. Варіанти електричних схем..... 38

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1
Методи перетворення кіл

Мета роботи: вивчення основних методів перетворення кіл для подальшого спрощення їх розрахунків.

Приклади перетворень електричних кіл

Взаємне перетворення джерел енергії



а) б)

Рисунок 1.1 – Взаємне перетворення схеми із джерелом струму у схему із джерелом напруги

Для схеми, що зображено на рис.1.1а, еквівалентна провідність кола обчислюється за виразом

$$G_{екв} = G_i + G_н, \qquad (1.1)$$

де G_i - провідність джерела струму; $G_н$ - провідність навантаження.

Напруга на навантаженні дорівнює

$$E = \frac{J}{G_{екв}} = \frac{J}{G_i + G_н}, \tag{1.2}$$

де J - струм джерела струму.

Струм у навантаженні дорівнює

$$i = E \cdot G_н = \frac{J \cdot G_н}{G_i + G_н} = \frac{J \cdot R_i}{R_i + R_н}, \tag{1.3}$$

де $R_i = 1/G_i$ - внутрішній опір джерела струму; $R_н$ - опір навантаження.

Для схеми, що зображено на рис.1.1б, еквівалентний опір кола обчислюється за виразом

$$R_{екв} = R_i + R_н. \tag{1.4}$$

Напруга джерела живлення дорівнює

$$E = J \cdot R_i. \tag{1.5}$$

Струм у навантаженні дорівнює

$$i = \frac{E}{R_{екв}} = \frac{J \cdot R_i}{R_i + R_н}. \tag{1.6}$$

Послідовне з'єднання

Послідовним з'єднанням провідників називається таке з'єднанням, при якому кінець першого провідника з'єднується з початком другого, кінець другого з'єднується з початком третього і т.д. (рис.1.2).

Еквівалентний опір такого кола обчислюється за виразом

$$R_{екв} = R_i + R_2 + R_3 + R_4 + R_5. \tag{1.7}$$

Струм у колі дорівнює

$$i = \frac{E}{R_{екв}}, \tag{1.8}$$

де E - напруга джерела живлення.

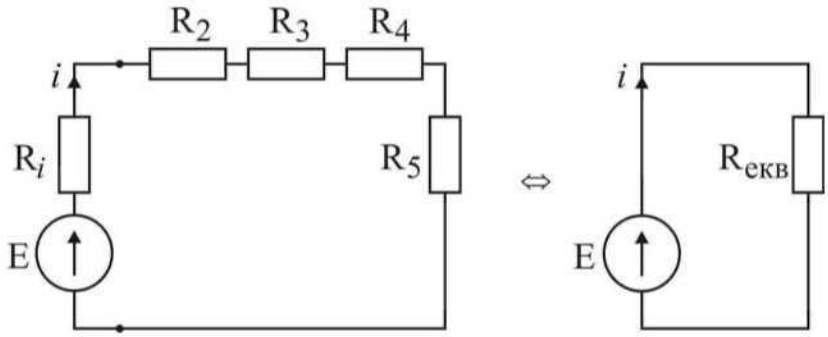


Рисунок 1.2 – Взаємне перетворення схеми із послідовним з'єднанням опорів у схему з еквівалентним опором

Напруга на кожному елементі кола дорівнює

$$U_k = i \cdot R_k. \tag{1.9}$$

де R_k - k - й опір кола.

Сума падінь напруги на кожному елементі кола дорівнює напрузі джерела живлення, тобто

$$\sum_k U_k = E. \tag{1.10}$$

Паралельне з'єднання

Паралельним з'єднанням провідників називається таке з'єднанням, при якому початки всіх провідників з'єднуються в одній точці, а кінці провідників – в другій точці (рис.1.3).

Еквівалентна провідність такого кола обчислюється за виразом

$$G_{екв} = G_i + G_2 + G_3 + G_4 + G_5, \tag{1.11}$$

Напруга у колі дорівнює

$$E = \frac{J}{G_{екв}}, \tag{1.12}$$

де J - струм джерела струму.

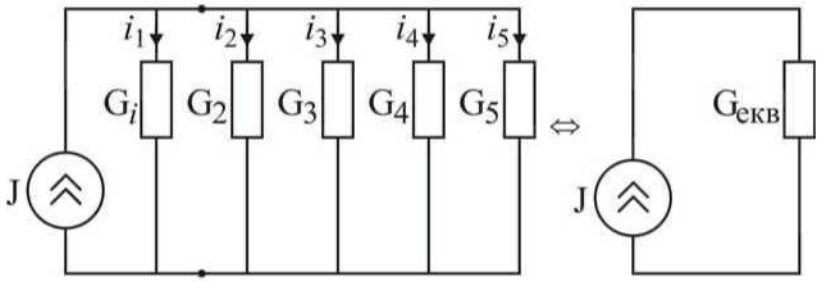


Рисунок 1.3 – Взаємне перетворення схеми із паралельним з'єднанням опорів у схему з еквівалентним опором

Струм у $к$ - й гілці кола визначається за формулою

$$i_к = E \cdot G_к, \tag{1.13}$$

де $G_к$ - провідність $к$ - ї гілки кола.

Для вказаної схеми сума струмів у кожній гілці дорівнює значенню струму джерела живлення, тобто

$$\sum_k i_k = J\,. \tag{1.14}$$

Драбинкові структури

Для побудови низькочастотних фільтрів застосовують електричні кола, які мають драбинкову структуру (рис.1.4).

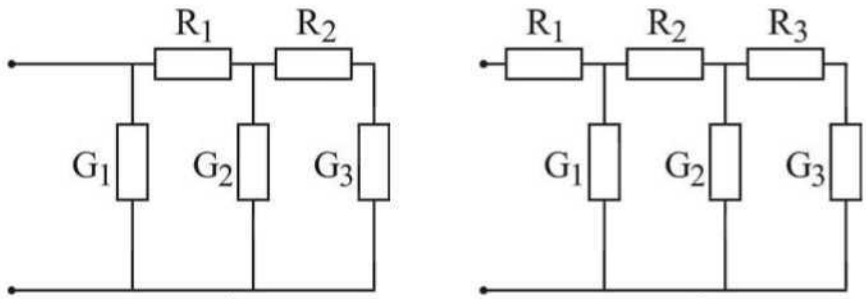


Рисунок 1.4 – Драбинкові кола

Вхідний опір $R_{вх}$ або вхідна провідність $G_{вх} = 1/R_{вх}$ драбинкових кіл уявляється у вигляді неперервної дробі.

Для кола на рис. 1.4 а, складеного з П - образних каскадів:

$$G_{вх} = G_1 + \cfrac{1}{R_1 + \cfrac{1}{G_2 + \cfrac{1}{R_2 + \cfrac{1}{G_3}}}}\,. \tag{1.15}$$

Для кола на рис. 1.4 б, складеного з Т - образних каскадів:

$$R_{вх} = R_1 + \cfrac{1}{G_1 + \cfrac{1}{R_2 + \cfrac{1}{G_2 + \cfrac{1}{R_3 + \cfrac{1}{G_3}}}}}. \qquad (1.16)$$

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з основними методами перетворення електричних кіл.
2. У середовищі MathCAD провести розрахунки струму у навантаженні для схеми із джерелом струму (рис.1.1а) та схеми із джерелом напруги (рис.1.1б). Перевірити співпадіння значень стуму у навантаженні для обох випадків. Номінали елементів схеми обираються з табл. А1 додатку А за умови, що $J = J_1$, $E = E_1$, $R_i = R_1$, $R_н = R_2$.
3. Для схеми із послідовним з'єднанням опорів (рис.1.2) за допомогою пакету MathCAD провести розрахунки падіння напруги на кожному елементі кола та перевірити виконання умови (1.10).
4. Для схеми із паралельним з'єднанням опорів (рис.1.3) за допомогою пакету MathCAD провести розрахунки струму у кожній гілці кола та перевірити виконання умови (1.14).
5. Для електричних кіл у вигляді драбинкових структур (рис.1.4) за допомогою пакету MathCAD провести розрахунки вхідного опору $R_{вх}$ $G_{вх}$
6. Оформити звіт.
7. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Перерахувати основні методи перетворення електричних кіл та розкрити їх сутність.
2. Дати визначення паралельного з'єднання провідників.
3. Як визначається еквівалентна провідність кола?
4. Як перевірити достовірність розрахунків струму у кожній гілці кола з паралельним з'єднанням провідників?
5. Дати визначення послідовного з'єднання провідників.
6. Як визначається еквівалентний опір кола?
7. Як перевірити достовірність розрахунків напруги на кожному елементі кола з послідовним з'єднанням провідників?
8. Як визначається вхідний опір кола, складеного з Т - образних каскадів?
9. Як визначається вхідна провідність кола, складеного з П - образних каскадів?
10. У реалізації яких пристроїв застосовують драбинкові кола?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Моделювання роботи електричного кола у середовищі Electronics Workbench (EWB)

Мета роботи: визначення струмів та напруг у гілках електричного кола за допомогою пакету Electronics Workbench.

Приклад моделювання роботи електричного кола

Детально опис роботи прикладного пакету Electronics Workbench наведено в [1]. З існуючого набору пасивних елементів (резисторів) та джерел енергії складемо схему, яка наведена на рис. 2.1. Для вимірювання струмів та напруг у гілках електричного кола застосуємо існуючий набір індикаторів (амперметрів, вольтметрів). Отримані схеми вимірювань наведено на рис. 2.2 та рис. 2.3.

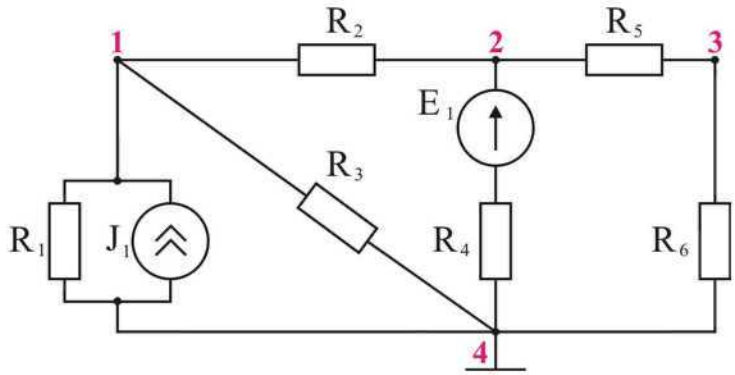


Рисунок 2.1 – Схема електричного кола

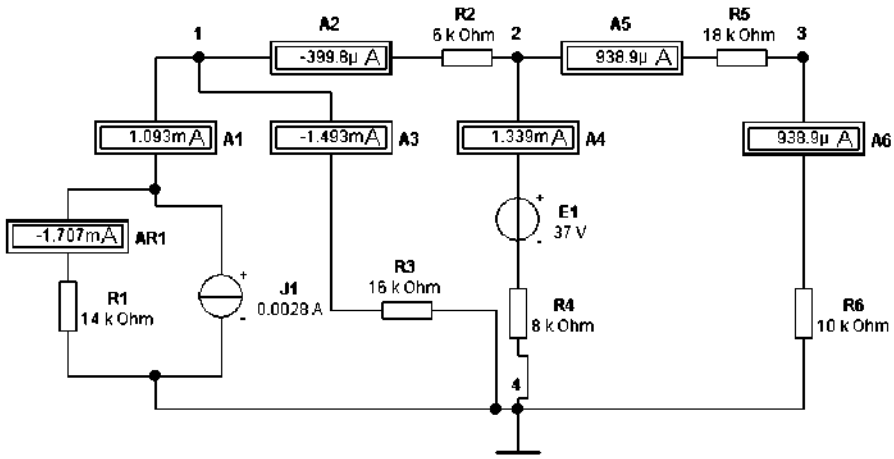


Рисунок 2.2 – Вимірювання струму у гілках електричного кола у середовищі EWB

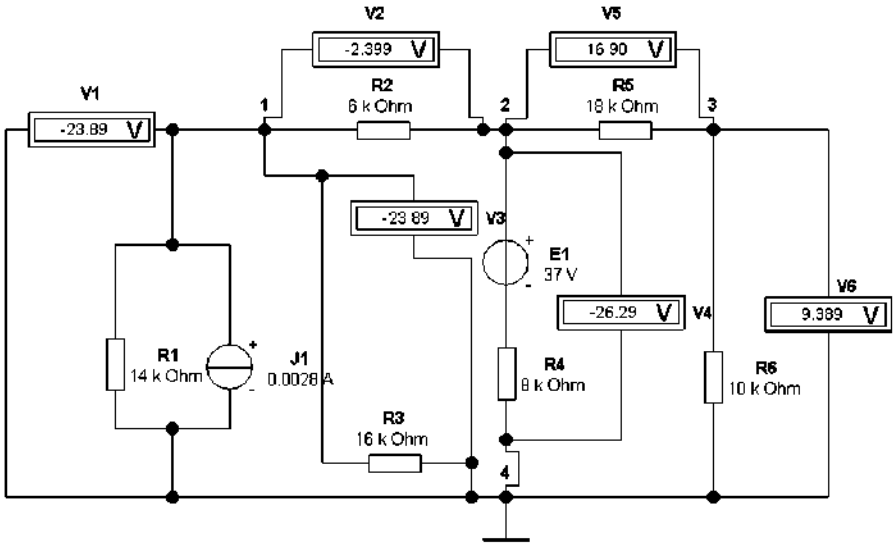


Рисунок 2.3 – Вимірювання напруги у гілках електричного кола у середовищі EWB

Аналіз роботи наданої схеми дає наступні результати:

- струм першої гілки дорівнює 1.093 mA;
- струм резистору R_1 дорівнює -1.707 mA;
- струм другої гілки дорівнює -399.8 μA;
- струм третьої гілки дорівнює -1.493 mA;
- струм четвертої гілки дорівнює 1.339 mA;
- струм п'ятої гілки дорівнює 938.9 μA;
- струм шостої гілки дорівнює 938.9 μA;
- напруга між вузлами 1-2 дорівнює -2.399 V;
- напруга між вузлами 1-4 дорівнює -23.89 V;
- напруга між вузлами 2-3 дорівнює 16.90 V;
- напруга між вузлами 2-4 дорівнює -26.29 V;
- напруга між вузлами 3-4 дорівнює 9.389 V.

Лабораторне завдання

1. Скласти в середовищі EWB електричну схему, що наведено в додатку Б, згідно варіанту студента у журналі.
2. Ввести номінали елементів схеми згідно з табл. А1 додатку А.
3. Підключити до кожної гілки схеми вимірюючі пристрої (амперметри та вольтметри).
4. Запустити режим "обчислення" у програмі та зафіксувати значення напруг між вузлами та струмів у кожній гілці.
5. Оформити звіт.
6. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Які умовні позначення мають елементи R, L, C?
2. Яким чином здійснюється складання схеми?
3. Як задаються номінали елементів схеми?
4. Яким чином здійснюється поворот елементів?
5. Як запустити режим "обчислення" у програмі?
6. У чому перевага програм EWB перед іншими подібними?

7. Навести недоліки моделювання складних схем постійного струму в програмному середовищі EWB.
8. Навести засоби вимірювання струму, напруги в EWB.
9. Пояснити яким чином підключаються до схеми пристрої вимірювання.
10. Що означають від'ємні значення струмів та напруг, що виміряні в EWB?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Розрахунок електричного кола методом струмів елементів

Мета роботи: визначення струмів елементів електричного кола за законами Кірхгофа.

Сутність методу

Метод струмів елементів – це один з методів розрахунку розгалуженого електричного кола довільної конфігурації, який базується на законах Кірхгофа для струмів та напруг [2-6].

При складанні рівнянь за законами Кірхгофа суттєве значення має кількість гілок, вузлів та контурів. **Гілка** – це ділянка кола, яка утворена послідовно з'єднаними елементами (крізь які протікає однаковий струм) та замкнена між двома вузлами. **Вузол** – це точка з'єднання трьох або більш гілок. Має місце також термін "усунений вузол" - це точка кола, в якій з'єднано два послідовних опори. **Контур** – будь-який замкнений шлях, що проходить крізь декілька гілок.

Перший закон Кірхгофа описує баланс струмів у вузлах кола: алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулеві, тобто

$$\sum_{к=2}^{n} I_к = 0. \qquad (3.1)$$

При складанні рівнянь за першим законом Кірхгофа спочатку обирають довільні напрямки струмів в усіх гілках електричного кола. Далі спрямовані до вузла струми записують зі знаком "+", а спрямовані від вузла - зі знаком "–". Кількість незалежних вузлових рівнянь дорівнює

$$N_{вр} = N_в - 1, \qquad (3.2)$$

де $N_в$ - кількість вузлів у схемі.

Другий закон Кірхгофа описує баланс напруги у контурах: алгебраїчна сума падінь напруги на елементах будь-якого замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил (Е.Р.С.) вздовж того ж контуру, тобто

$$\sum_{k=1}^{p} U_k = \sum_{m=1}^{q} E_m \,, \tag{3.3}$$

де $U_k = R_k I_k$ - падіння напруги на k - му опорі; E_m - Е.Р.С. m - го джерела напруги.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа спочатку задають довільні напрямки обходу кожного незалежного контуру досліджуваного електричного кола. Далі напругу на опорах гілок контуру (або Е.Р.С) записують зі знаком "+", якщо напрямок обходу контуру збігається із напрямком струму в гілках (із напрямком Е.Р.С.), та при розбіжності вказаних напрямків ці величини записують зі знаком "–". Кількість незалежних контурних рівнянь дорівнює

$$N_{kp} = N_г - N_{гдс} - N_в + 1, \tag{3.4}$$

де $N_г$ - загальна кількість гілок у схемі; $N_{гдс}$ - кількість гілок у схемі, які містять джерело струму; $N_в$ - кількість вузлів у схемі.

Отже, алгоритм розрахунку електричного кола за методом струмів елементів наступний:

а) якщо електрична схема містить джерело струму, то проводять її перетворення за алгоритмом, який наведено на рис. 3.1;

б) за першим законом Кірхгофа складають рівняння для вузлів схеми, а за другим законом - рівняння для контурів; отримують систему рівнянь;

в) за допомогою MathCAD – програми розв'язують отриману систему, тобто знаходять власні струми кожної гілки.

Недоліком методу є системи рівнянь великої розмірності.

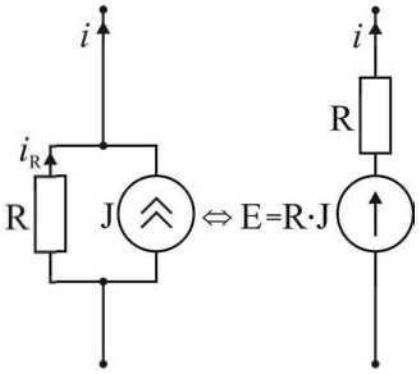


Рисунок 3.1 – Перетворення джерела струму в еквівалентне джерело напруги

Приклад розрахунку

Згідно з наведеним на рис. 3.1 перетворенням, досліджувана електрична схема (рис. 2.1) матиме вигляд

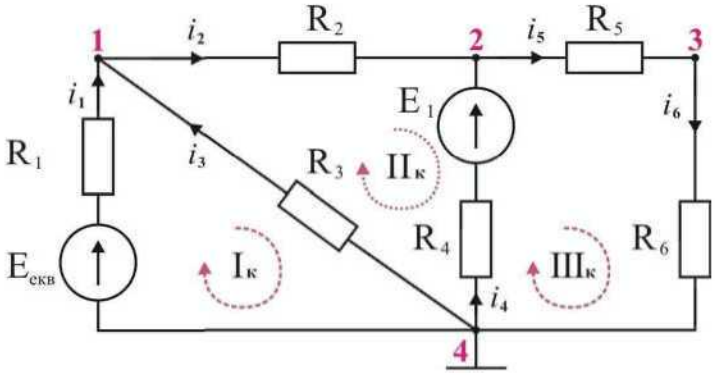


Рисунок 3.2 – Схема електричного кола

Його параметри розраховано згідно з табл. А1 додатку А: величина джерела напруги $E_1 = 37$ В; величина джерела струму $J_1 = 2{,}8$ мА; опори резисторів $R_1 = 14$ кОм; $R_2 = 6$ кОм;

$R_3 = 16$ кОм; $R_4 = 8$ кОм; $R_5 = 18$ кОм; $R_6 = 10$ кОм. Потрібно визначити струми у гілках за допомогою законів Кірхгофа.

За першим законом Кірхгофа складаємо рівняння для вузлів 1, 2, 3 та за другим законом - рівняння для контурів I к, II к, III к. Отримаємо систему рівнянь

$$\begin{array}{ll} 1\ в: & \begin{cases} i_1 - i_2 + i_3 = 0; \\ i_2 + i_4 - i_5 = 0; \\ i_2 + i_4 - i_5 = 0; \\ i_1 \cdot R_1 - i_3 \cdot R_3 = E_{екв}; \\ i_2 \cdot R_2 + i_3 \cdot R_3 - i_4 \cdot R_4 = -E_1; \\ i_4 \cdot R_4 + i_5 \cdot R_5 + i_6 \cdot R_6 = E_1, \end{cases} \\ 2\ в: & \\ 3\ в: & \\ I\ k: & \\ II\ k: & \\ III\ k: & \end{array} \qquad (3.5)$$

де $E_{екв} = J_1 \cdot R_1$.

Розв'язок системи (3.5) проведемо за допомогою пакету MathCAD. Для цього застосуємо матричний метод розв'язку системи рівнянь. Побудуємо матрицю коефіцієнтів N при невідомих струмах та вектор–стовпець відомих параметрів V (вектор впливу).

Eekv := R1·J1

$$N := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ R1 & 0 & -R3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R2 & R3 & -R4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R4 & R5 & R6 \end{pmatrix} \qquad V := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Eekv \\ -E1 \\ E1 \end{pmatrix}$$

Матрицю шуканих струмів знайдемо за допомогою оберненої матриці. Отримаємо струми в амперах у вигляді вектору–стовпця.

$$I := N^{-1} \cdot V \qquad I = \begin{pmatrix} 1.093454 \times 10^{-3} \\ -3.997743 \times 10^{-4} \\ -1.493228 \times 10^{-3} \\ 1.338713 \times 10^{-3} \\ 9.389391 \times 10^{-4} \\ 9.389391 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Струм резистору R_1 в амперах дорівнює

$$iR1 := I_1 - J1 \qquad iR1 = -1.706546 \times 10^{-3}$$

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з алгоритмом розрахунку електричних кіл методом струмів елементів.
2. Обрати схему, що наведено в додатку Б, згідно варіанту студента у журналі. У даній схемі пронумерувати вузли, обрати напрями струмів у кожній гілці та напрями обходу контурів.
3. Скласти систему рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа.
4. Провести розв'язок отриманої системи за допомогою пакету MathCAD із застосуванням матричного методу.
5. Порівняти отримані значення струмів у кожній гілці кола зі значеннями, що отримано за допомогою програми EWB.
6. Оформити звіт.
7. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Дати визначення термінам “гілка”, “вузол”, “усунений вузол”, “контур”.
2. Пояснити що таке незалежні контури і незалежні вузли.
3. Розкрити сутність методу струмів елементів.

4. Сформулювати закон Ома.
5. Сформулювати перший закон Кірхгофа.
6. Сформулювати другий закон Кірхгофа.
7. Пояснити яким чином обираються напрямки для струмів гілок та як з ними пов'язані додатні напрямки напруг на опорах.
8. Пояснити яким чином обирається напрям обходу контуру.
9. Скільки рівнянь треба скласти за першим та другим законами Кірхгофа?
10. Навести переваги і недоліки методу струмів елементів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Розрахунок електричного кола методом контурних струмів

Мета роботи: визначення власних струмів гілок розгалуженого електричного кола методом контурних струмів.

Сутність методу

Метод контурних струмів – це метод розрахунку електричного кола довільної конфігурації, в якому за невідомі величини приймають контурні струми. Власні струми кожної гілки кола визначають за принципом суперпозиції: як алгебраїчну суму контурних струмів, що проходять через гілку кола [2-6].

Цей метод застосовують для розрахунку складних електричних кіл, у яких кількість вузлів без одиниці більша за кількість незалежних контурів.

Алгоритм розрахунку електричного кола за методом контурних струмів наступний:

а) якщо електрична схема містить джерело струму, то проводять її перетворення за алгоритмом, який наведено на рис. 3.1;

б) визначають незалежні контури; їх число складає

$$N_{нк} = N_г - N_в + 1, \qquad (4.1)$$

де $N_г$ - загальна кількість гілок у схемі; $N_в$ - кількість вузлів у схемі;

в) визначають однакові для всіх контурних струмів I_{11} I_{22} I_{KK}

г) складають систему рівнянь; кількість незалежних рівнянь дорівнює кількості незалежних контурів; у загальному вигляді систему контурних рівнянь можна записати наступним чином:

$$\begin{cases} R_{11}I_{11} - R_{12}I_{22} - ... - R_{1K}I_{KK} = E_{11}; \\ -R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} - ... - R_{2K}I_{KK} = E_{22}; \\ ********** \\ -R_{K1}I_{11} - R_{K2}I_{22} + ... + R_{KK}I_{KK} = E_{KK}, \end{cases} \quad (4.2)$$

де I_{ii} - контурний струм; R_{ii} - власний опір контуру; R_{ij} - спільний опір контурів i, j, причому $R_{ij} = R_{ji}$; E_{ii} - контурна Е.Р.С., яка дорівнює сумі усіх Е.Р.С., що входять до контуру; Е.Р.С записують зі знаком "+", якщо їх напрямок збігається із напрямком обходу контуру, та зі знаком "–", якщо не збігається;

д) отриману систему рівнянь розв'язують довільним методом;

е) визначають власні струми гілок через отримані контурні струми.

Приклад розрахунку

Згідно з наведеним на рис. 3.1 перетворенням, досліджувана електрична схема (рис. 2.1) матиме вигляд

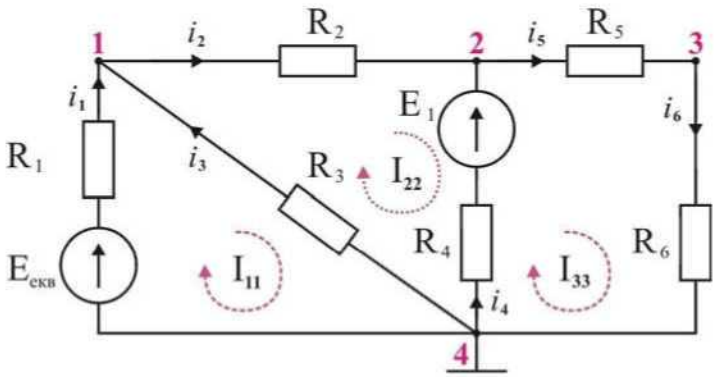


Рисунок 4.1 – Схема електричного кола

Обираємо обіг контурів Ік, ІІк, ІІІк (рис.3.1) та контурних струмів у цих контурах (I_{11} ; I_{22} ; I_{33}) за обігом годинникової стрілки. Складаємо систему рівнянь.

$$\begin{array}{l} I\ k: \\ II\ k: \\ III\ k: \end{array} \begin{cases} I_{11}\cdot(R_1+R_3)-I_{22}\cdot R_3 = E_{екв}; \\ -I_{11}\cdot R_3+I_{22}\cdot(R_2+R_3+R_4)-I_{33}\cdot R_4 = -E_1; \\ -I_{22}\cdot R_4+I_{33}\cdot(R_4+R_5+R_6)=E_1, \end{cases} \qquad (4.3)$$

де $E_{екв} = J_1 \cdot R_1$.

Для розв'язку системи (4.3) у середовищі MathCAD побудуємо матрицю коефіцієнтів R при невідомих контурних струмах та вектор–стовпець відомих параметрів E.

$$\text{Eekv} := \text{R1}\cdot\text{J1}$$

$$\text{R} := \begin{pmatrix} \text{R1}+\text{R3} & -\text{R3} & 0 \\ -\text{R3} & \text{R2}+\text{R3}+\text{R4} & -\text{R4} \\ 0 & -\text{R4} & \text{R4}+\text{R5}+\text{R6} \end{pmatrix} \qquad \text{E} := \begin{pmatrix} \text{Eekv} \\ -\text{E1} \\ \text{E1} \end{pmatrix}$$

Матрицю шуканих контурних струмів знайдемо за допомогою оберненої матриці. Отримаємо контурні струми в амперах у вигляді вектору–стовпця.

$$\text{I} := \text{R}^{-1}\cdot\text{E} \qquad \text{I} = \begin{pmatrix} 1.093454\times 10^{-3} \\ -3.997743\times 10^{-4} \\ 9.389391\times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Власні струми гілок знайдемо за принципом суперпозиції контурних струмів.

$$\text{i}_1 := \text{I}_1 \qquad \text{i}_2 := \text{I}_2 \qquad \text{i}_3 := \text{I}_2 - \text{I}_1$$

$$\text{i}_4 := \text{I}_3 - \text{I}_2 \qquad \text{i}_5 := \text{I}_3 \qquad \text{i}_6 := \text{I}_3$$

Напругу кожної гілки кола знайдемо за законом Ома

$u_1 := i_1 \cdot R1 - J1 \cdot R1$ $u_2 := i_2 \cdot R2$ $u_3 := i_3 \cdot R3$

$u_4 := i_4 \cdot R4 - E1$ $u_5 := i_5 \cdot R5$ $u_6 := i_6 \cdot R6$

Власні струми в амперах та напруги у вольтах кожної гілки кола отримаємо у вигляді векторів–стовпців.

$$i = \begin{pmatrix} 1.093454 \times 10^{-3} \\ -3.997743 \times 10^{-4} \\ -1.493228 \times 10^{-3} \\ 1.338713 \times 10^{-3} \\ 9.389391 \times 10^{-4} \\ 9.389391 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \qquad u = \begin{pmatrix} -23.891648 \\ -2.398646 \\ -23.891648 \\ -26.290293 \\ 16.900903 \\ 9.389391 \end{pmatrix}$$

Струм резистору R_1 в амперах дорівнює

$iR1 := i_1 - J1$ $iR1 = -1.706546 \times 10^{-3}$

Виконаємо перевірку отриманих результатів за законами Кірхгофа

$i_1 + i_3 - i_2 = 0$ $u_1 - u_3 = 7.105427 \times 10^{-15}$

$i_2 + i_4 - i_5 = 0$ $u_3 + u_2 - u_4 - E1 = -37$

$i_5 - i_6 = 0$ $u_4 + E1 + u_5 + u_6 = 37$

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з алгоритмом розрахунку електричних кіл методом контурних струмів.
2. Для схеми згідно варіанту студента у журналі виконати необхідне перетворення та обрати напрями контурних струмів.
3. Скласти систему рівнянь відносно контурних струмів.
4. Провести розв'язок отриманої системи за допомогою пакету MathCAD із застосуванням матричного методу.
5. Визначити власні струми гілок за принципом суперпозиції контурних струмів та напругу кожної гілки кола за законом Ома.
6. Порівняти отримані значення струмів та напруг у кожній гілці кола зі значеннями, які отримано за допомогою програми EWB.
7. Оформити звіт.
8. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Пояснити сутність методу контурних струмів.
2. У яких випадках розрахунку складних електричних кіл застосовують метод контурних струмів?
3. Пояснити які еквівалентні перетворення застосовують в методі контурних струмів.
4. Навести алгоритм розрахунку електричного кола за методом контурних струмів.
5. Як визначається кількість незалежних контурів?
6. Скільки незалежних рівнянь матиме система рівнянь, складена за цим методом?
7. Як визначається знак контурної Е.Р.С.?
8. За яким принципом знаходять власні струми гілок?
9. Навести переваги і недоліки методу контурних струмів.
10. Пояснити яким чином виконується перевірка достовірності отриманих результатів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Розрахунок електричного кола методом вузлових потенціалів

Мета роботи: визначення власних струмів гілок розгалуженого електричного кола методом вузлових потенціалів.

Сутність методу

Метод вузлових потенціалів – це метод розрахунку електричного кола довільної конфігурації, в якому за невідомі величини приймають потенціали вузлів схеми. Власні струми кожної гілки кола визначають за законом Ома [2-6].

Цей метод застосовують для розрахунку складних електричних кіл, у яких кількість вузлів без одиниці менша за кількість незалежних контурів.

Алгоритм розрахунку електричного кола за методом вузлових потенціалів наступний.

а) елементи кола перетворюють до вигляду, який є припустимим для методу вузлових потенціалів:

1) опори замінюють провідностями $R_i \Rightarrow G_i$;

2) джерела напруги замінюють джерелами струму $E_i \Rightarrow J_i$;

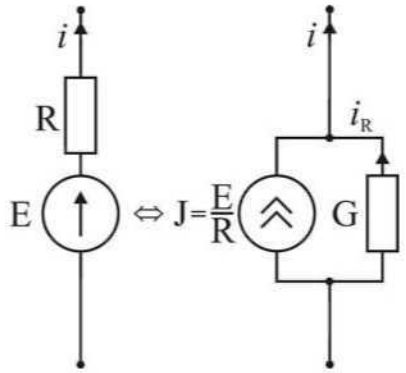


Рисунок 5.1 – Перетворення джерела напруги в еквівалентне джерело струму

б) потенціал вузла, який з'єднує найбільшу кількість гілок, умовно приймають рівним нулеві і називають **базисним**;

в) складають систему вузлових рівнянь; кількість вузлових рівнянь повинна бути на одиницю менше за кількість вузлів схеми; у загальному випадку система має вигляд:

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 - G_{13}\varphi_3 - \ldots - G_{1n}\varphi_n = J_{11}; \\ -G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 - G_{23}\varphi_3 - \ldots - G_{2n}\varphi_n = J_{22}; \\ ********** \\ -G_{n1}\varphi_1 - G_{n2}\varphi_2 - G_{n3}\varphi_3 - \ldots + G_{nn}\varphi_n = J_{nn}, \end{cases} \quad (5.1)$$

де φ_i - потенціал i-го вузла; G_{ii} - власна провідність вузла, що дорівнює сумі провідностей гілок, приєднаних до i-го вузла; G_{ij} - спільна провідність вузлів i, j, причому $G_{ij} = G_{ji}$; J_{ii} - вузловий струм i-го вузла, який дорівнює сумі струмів усіх джерел струму у гілках, приєднаних до i-го вузла. Ці складові вузлового струму записують зі знаком "+", якщо вони спрямовані до вузла, та зі знаком "–", якщо вони спрямовані від вузла.

г) отриману систему рівнянь розв'язують довільним методом;

д) за законом Ома визначають власні струми гілок через отримані вузлові потенціали.

Приклад розрахунку

Згідно з наведеним на рис. 5.1 перетворенням, досліджувана електрична схема (рис. 3.1) перетвориться до схеми, що показано на рис. 5.2.

На рис. 5.2 позначено: $G_1 = 1/R_1$, $G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$, $G_4 = 1/R_4$, $G_5 = 1/R_5$, $G_6 = 1/R_6$, $J_{екв} = E_1/R_4 = E_1 \cdot G_4$.

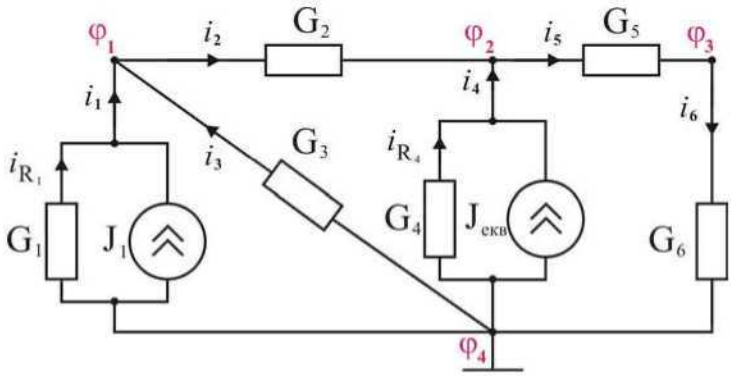


Рисунок 5.2 – Схема електричного кола

Для наведеної схеми складаємо систему вузлових рівнянь

$$\begin{cases} G_{11}\cdot\varphi_1 - G_{12}\cdot\varphi_2 - G_{13}\cdot\varphi_3 = J_1; \\ -G_{21}\cdot\varphi_1 + G_{22}\cdot\varphi_2 - G_{23}\cdot\varphi_3 = J_{екв}; \\ -G_{31}\cdot\varphi_1 - G_{32}\cdot\varphi_2 + G_{33}\cdot\varphi_3 = 0, \end{cases} \qquad (5.2)$$

де $G_{11} = G_1 + G_2 + G_3$; $G_{22} = G_2 + G_4 + G_5$; $G_{33} = G_5 + G_6$;
$G_{12} = G_{21} = G_2$; $G_{13} = G_{31} = 0$; $G_{23} = G_{32} = G_5$;.

Для розв'язку системи (5.2) у середовищі MathCAD введемо нові елементи і побудуємо матрицю провідностей G та вектор–стовпець джерел струму J.

$$G1 := R1^{-1} \qquad G2 := R2^{-1} \qquad G3 := R3^{-1}$$
$$G4 := R4^{-1} \qquad G5 := R5^{-1} \qquad G6 := R6^{-1}$$

$$Jekv := E1\cdot G4$$

$$G := \begin{pmatrix} G1 + G2 + G3 & -G2 & 0 \\ -G2 & G2 + G4 + G5 & -G5 \\ 0 & -G5 & G5 + G6 \end{pmatrix} \qquad J := \begin{pmatrix} J1 \\ Jekv \\ 0 \end{pmatrix}$$

Матрицю шуканих вузлових потенціалів знайдемо за допомогою формули

$$\phi := G^{-1} \cdot J$$

Отримаємо вузлові потенціали в вольтах у вигляді вектору–стовпця

$$\phi = \begin{pmatrix} 23.891648 \\ 26.290293 \\ 9.389391 \end{pmatrix}$$

Через потенціали вузлів розрахуємо напруги у гілках електричного кола

$u_1 := 0 - \phi_1$ $\quad$ $u_2 := \phi_1 - \phi_2$ $\quad$ $u_3 := 0 - \phi_1$

$u_4 := 0 - \phi_2$ $\quad$ $u_5 := \phi_2 - \phi_3$ $\quad$ $u_6 := \phi_3 - 0$

Далі за законами Ома та Кірхгофа визначимо струми у гілках

$i_1 := u_1 \cdot G1 + J1$ $\quad$ $i_2 := u_2 \cdot G2$ $\quad$ $i_3 := u_3 \cdot G3$

$i_4 := u_4 \cdot G4 + E1 \cdot G4$ $\quad$ $i_5 := u_5 \cdot G5$ $\quad$ $i_6 := u_6 \cdot G6$

Таким чином, отримаємо вектор–стовпець напруг та вектор–стовпець струмів у гілках

$$i = \begin{pmatrix} 1.093454\times 10^{-3} \\ -3.997743\times 10^{-4} \\ -1.493228\times 10^{-3} \\ 1.338713\times 10^{-3} \\ 9.389391\times 10^{-4} \\ 9.389391\times 10^{-4} \end{pmatrix} \qquad u = \begin{pmatrix} -23.891648 \\ -2.398646 \\ -23.891648 \\ -26.290293 \\ 16.900903 \\ 9.389391 \end{pmatrix}$$

Струм резистору R_1 в амперах дорівнює

$$iR1 := i_1 - J1 \qquad iR1 = -1.706546\times 10^{-3}$$

Виконаємо перевірку отриманих результатів за законами Кірхгофа

$$i_1 + i_3 - i_2 = 0 \qquad u_1 - u_3 = 0$$

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0 \qquad u_3 + u_2 - u_4 - E1 = -37$$

$$i_5 - i_6 = 0 \qquad u_4 + E1 + u_5 + u_6 = 37$$

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з алгоритмом розрахунку електричних кіл методом вузлових потенціалів.
2. Для схеми згідно варіанту студента у журналі виконати необхідне перетворення та обрати базисний вузол.
3. Скласти систему вузлових рівнянь.
4. Провести розв'язок отриманої системи за допомогою пакету MathCAD із застосуванням матричного методу.

5. Через отримані потенціали вузлів розрахувати напруги у кожній гілці електричного кола та власні струми гілок за законом Ома.
6. Порівняти отримані значення струмів та напруг у кожній гілці кола зі значеннями, які отримано за допомогою програми EWB.
7. Оформити звіт.
8. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Пояснити сутність методу вузлових потенціалів.
2. У яких випадках розрахунку складних електричних кіл застосовують методу вузлових потенціалів?
3. Пояснити які еквівалентні перетворення застосовують в методі вузлових потенціалів.
4. Навести алгоритм розрахунку електричного кола за методом вузлових потенціалів.
5. Що таке базисний вузол?
6. Скільки вузлових рівнянь матиме система рівнянь, складена за цим методом?
7. Як визначається знак вузлового струму?
8. За яким принципом знаходять власні струми гілок?
9. За якої умови число рівнянь, складених за методом вузлових потенціалів, менше числа рівнянь, складених за методом контурних струмів?
10. Навести переваги і недоліки методу вузлових потенціалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Розрахунок балансу потужностей та потенціальної діаграми електричного кола

Мета роботи: перевірка виконання балансу потужностей та побудова потенціальної діаграми найдовшого замкненого контуру.

Теоретичні відомості

Баланс потужностей

На підставі закону збереження енергії кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу на опорах схеми, повинно дорівнювати енергії, що доставляється за той же час джерелами живлення [2]. Отже, **рівняння енергетичного балансу** за умови живлення від джерел Е.Р.С. та джерел струму має вигляд

$$\sum_k I_k^2 R_k = \sum_k E_k I_k + \sum_k U_{mn} J_k , \qquad (6.1)$$

де I_k - струм k-ї гілки; R_k - опір k-ї гілки; E_k - джерело Е.Р.С.; U_{mn} - напруга ділянки кола, у якій знаходиться джерело струму J_k.

Таким чином, ліва частина (6.1) описує загальну потужність споживачів, а права – загальну потужність джерел енергії усього кола.

Потенціальна діаграма

Потенціальна діаграма – це графічне зображення розподілу потенціалів уздовж будь-якої ділянки або замкнутого контуру електричного кола.

Алгоритм побудови наступний:

а) обирається замкнутий контур з найбільшою кількістю ЕРС;
б) потенціал однієї точки контуру вважається нульовим;
в) знаходяться потенціали усіх точок контуру за законом Ома;
г) обирається напрямок обходу контуру;

д) формується вектор–стовпець потенціалів у контурі, обов'язково дотримуючись порядку його обходу;

е) формується вектор–стовпець опорів, обов'язково дотримуючись порядку його обходу і додаючи один до одного опори ділянок контуру;

ж) будується потенціальна діаграма (вісь абсцис – вектор опорів, вісь ординат – вектор потенціалів).

Приклад розрахунку

Для схеми, яку зображено на рис. 3.1, за виразом (6.1) у середовищі MathCAD знайдемо загальну потужність споживачів у ватах

$$Pc := (i_1)^2 \cdot R1 + (i_2)^2 \cdot R2 + (i_3)^2 \cdot R3 + (i_4)^2 \cdot R4 + (i_5)^2 \cdot R5 + (i_6)^2 \cdot R6$$

$$Pc = 0.092396$$

та загальну потужність джерел енергії усього кола у ватах

$$Pk := E1 \cdot i_4 + J1 \cdot R1 \cdot i_1 \qquad Pk = 0.092396$$

Оскільки Pc=Pk, то енергетичний баланс виконується і розрахунки кола виконано правильно.

Далі побудуємо потенціальну діаграму для замкнутого контуру 4-1-2-3-4 згідно вищенаведеному алгоритму. Напрямок обходу контуру обираємо за обігом годинникової стрілки.

Вектор–стовпець потенціалів у контурі матиме вигляд

$$\Phi := (\phi_4 \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4)^T \qquad \Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ 23.891648 \\ 26.290293 \\ 9.389391 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вектор–стовпець опорів у контурі матиме вигляд

$$R := \begin{pmatrix} 0 \\ R1 \\ R1 + R2 \\ R1 + R2 + R5 \\ R1 + R2 + R5 + R6 \end{pmatrix} \qquad R = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.4 \times 10^4 \\ 2 \times 10^4 \\ 3.8 \times 10^4 \\ 4.8 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Потенціальна діаграма матиме вигляд

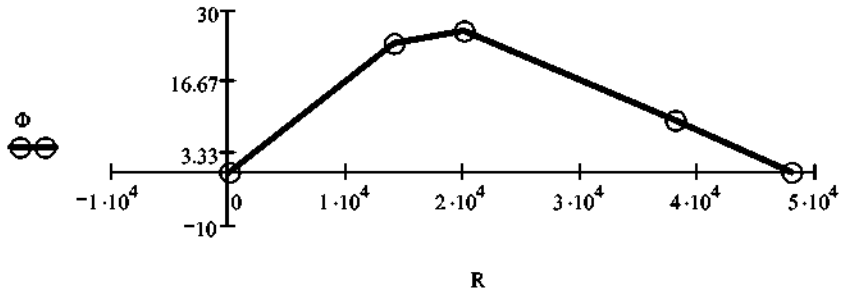


Рисунок 6.1 – Потенціальна діаграма

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з алгоритмом побудови потенціальної діаграми.
2. Для схеми згідно варіанту студента у журналі за допомогою MathCAD - програми знайти загальну потужність споживачів та загальну потужність джерел енергії усього кола. Перевірити виконання енергетичного балансу.
3. Виконати побудову потенціальної діаграми для обраного замкнутого контуру згідно вищенаведеному алгоритму.
4. Оформити звіт.
5. Відповісти на контрольні запитання.

Контрольні питання

1. Яким чином визначається загальна потужність споживачів електричного кола?
2. Яким чином визначається загальна потужність джерел енергії усього електричного кола?
3. Сформулювати закон збереження енергії та навести рівняння енергетичного балансу.
4. Пояснити що може означати невиконання умови балансу потужностей кола.
5. Дати визначення потенціальної діаграми.
6. Навести алгоритм побудови потенціальної діаграми.
7. Яким чином обирається замкнутий контур?
8. Як знаходяться потенціали усіх точок контуру?
9. Як графічно зобразити потенціальну діаграму?
10. Пояснити коли потенціальна діаграма не збігається.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Костенко В.О., Ключко В.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з допомогою програми "Electronics Workbench". Ч.1 – Запоріжжя: ЗНТУ, 2004. - 24 стор.
2. Бессонов Л.А.Теоретические основы электротехники. Изд. 9-е, переработанное и дополненное. - М.: Высшая школа, 1996. - 528 с.
3. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1987. - 357 с.
4. Попов В.П. Основы теории цепей. - М. Высшая школа, 1985. - 486с.
5. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.
6. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. Изд. 2-е, переработанное. - М.: Высшая школа, 1968. - 590с.

Додаток А
Елементи електричного кола

Таблиця А.1 – Значення елементів електричного кола

Назва елементу схеми	Позначення	Вираз для обчислення
Джерело ЕРС, В	E_1	$2 \cdot n + h - m$
	E_2	$3 \cdot n + d - 2m$
Джерело струму, мА	J_1	$0{,}1 \cdot (n + h)$
	J_2	$0{,}1 \cdot (n + d)$
Резистори, кОм	R_1	$1 + h$
	R_2	$2 + d$
	R_3	$3 + h$
	R_4	$4 + d$
	R_5	$5 + h$
	R_6	$6 + d$

n - порядковий номер студента у журналі академічної групи

m - сума цифр у порядковому номеру студента

d - кількість букв у імені студента

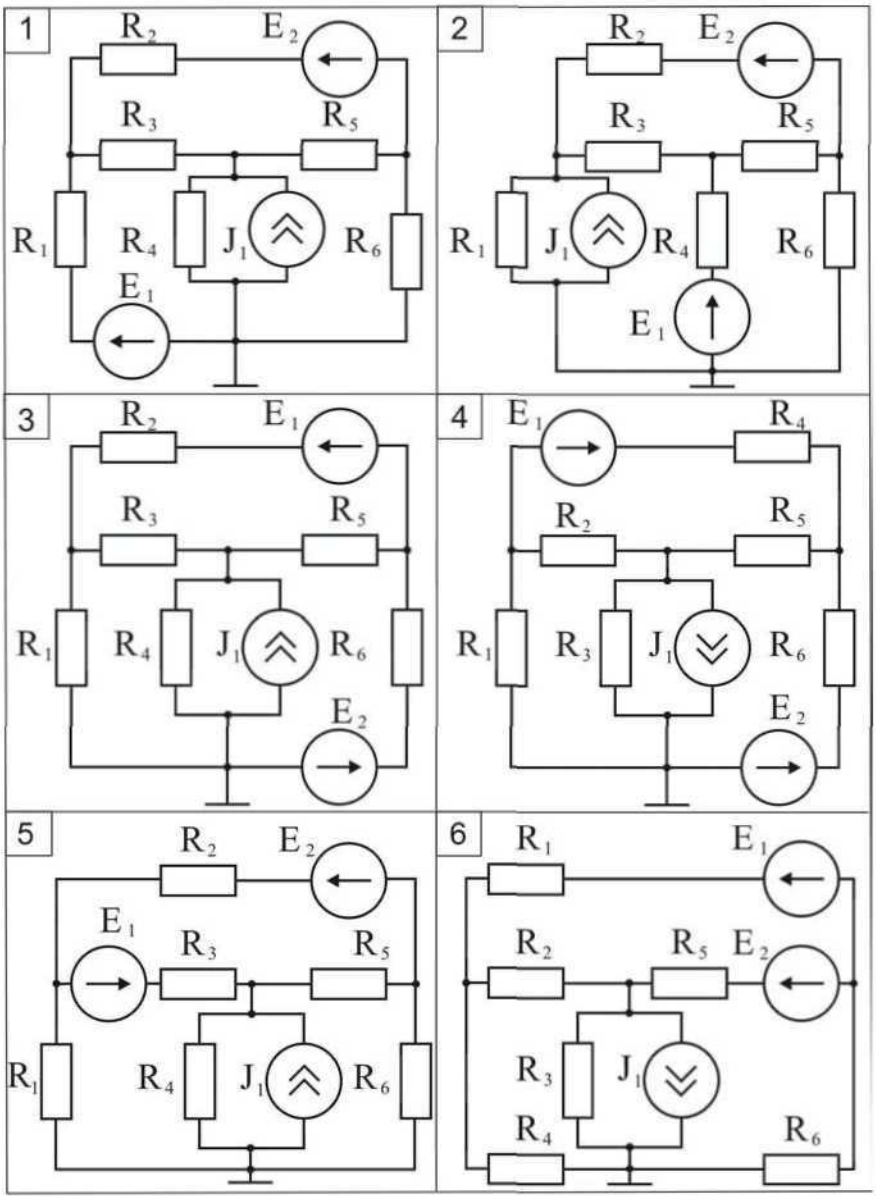
h - кількість букв у прізвищі студента

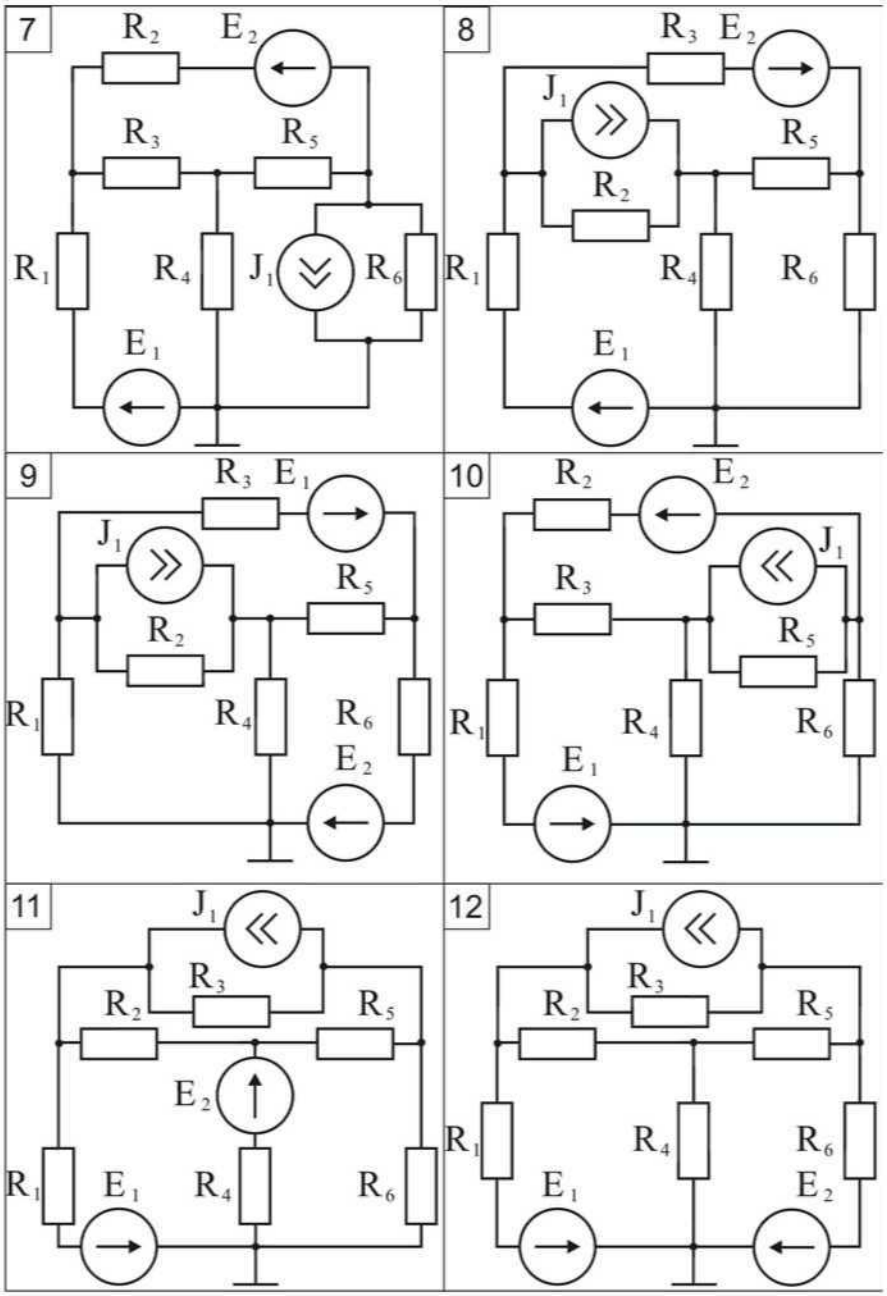
Приклад: Іванов Юрій Костянтинович має порядковий номер у журналі академічної групи 15. Отже, для нього $n = 15$; $m = 6$; $d = 4$; $h = 13$, а елементи схеми набувають значень $E_1 = 37\,\text{В}$; $E_2 = 37\,\text{В}$;

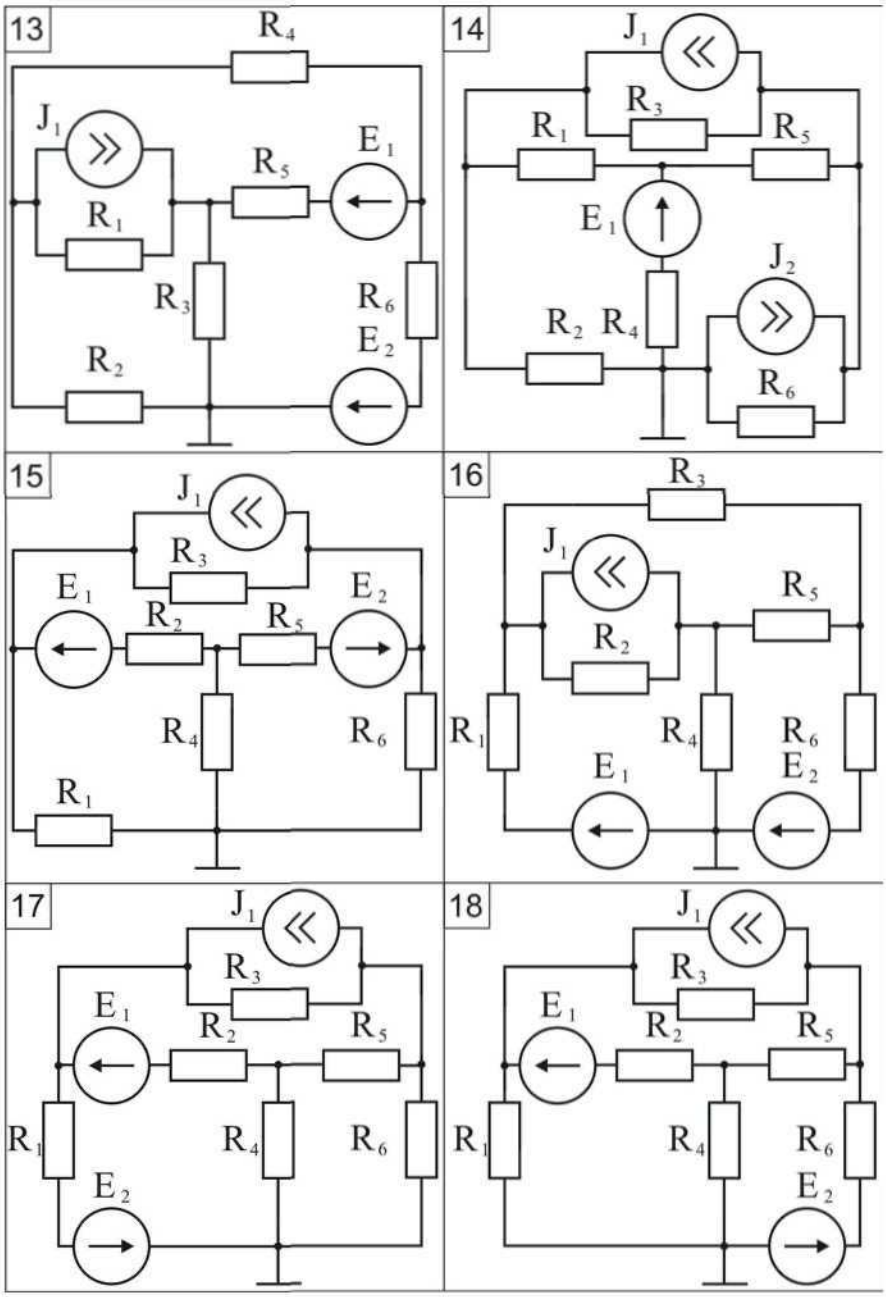
$J_1 = 2{,}8$ мА; $J_2 = 1{,}9$ мА; $R_1 = 14$ кОм; $R_2 = 6$ кОм; $R_3 = 16$ кОм; $R_4 = 8$ кОм; $R_5 = 18$ кОм; $R_6 = 10$ кОм.

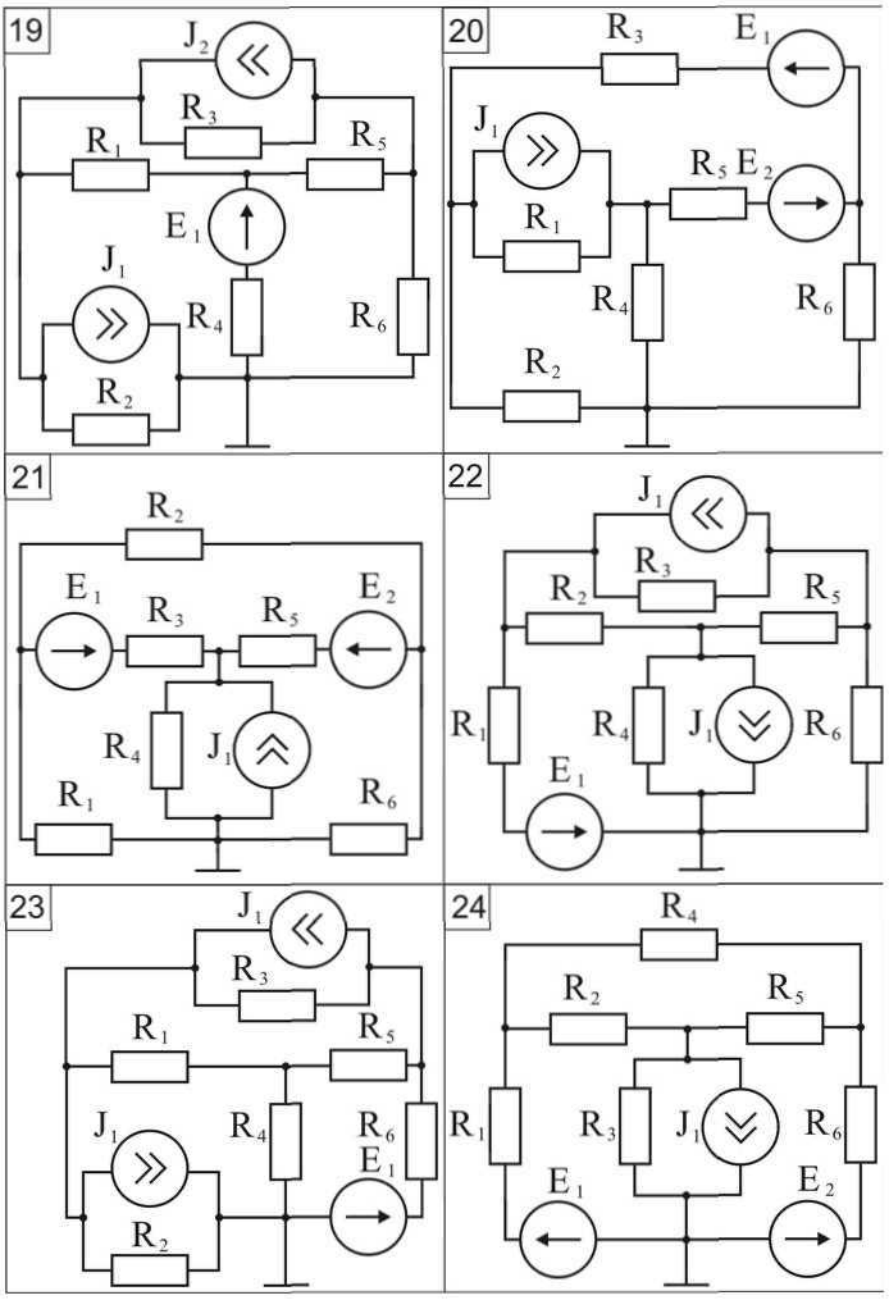
Додаток Б

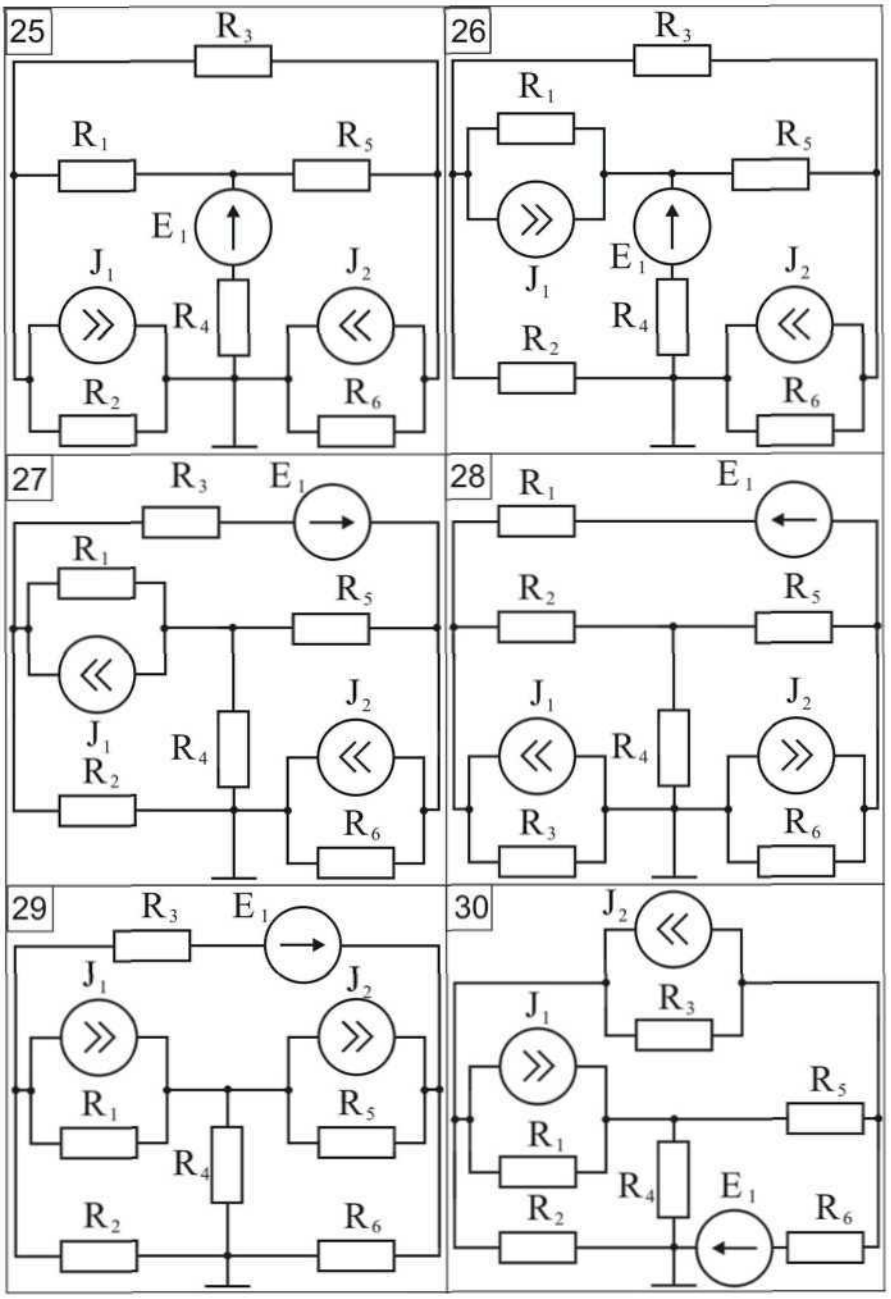
Варіанти електричних схем


1
R2
E2
R3
R5
R1
R4
J1
R6
E1
2
R2
E2
R3
R5
R1
J1
R4
R6
E1
3
R2
E1
R3
R5
R1
R4
J1
R6
E2
4
E1
R4
R2
R5
R1
R3
J1
R6
E2
5
R2
E2
E1
R3
R5
R1
R4
J1
R6
6
R1
E1
R2
R5
E2
R3
J1
R4
R6


7
R2 E2
R3 R5
R1 R4 J1 R6
E1
8
R3 E2
J1
R5
R2
R1 R4 R6
E1
9
R3 E1
J1
R5
R2
R1 R4 R6
E2
10
R2 E2
J1
R3
R5
R1 R4 R6
E1
11
J1
R3
R2 R5
E2
R1 E1 R4 R6
12
J1
R3
R2 R5
R1 R4 R6
E1 E2


13
R4
J1
R5
E1
R1
R3
R6
E2
R2
14
J1
R3
R1
R5
E1
J2
R2
R4
R6
15
J1
R3
E1
E2
R2
R5
R4
R6
R1
16
R3
J1
R5
R2
R1
R4
R6
E1
E2
17
J1
R3
E1
R2
R5
R1
R4
R6
E2
18
J1
R3
E1
R2
R5
R1
R4
R6
E2


19
J2
R3
R1
R5
E1
J1
R4
R6
R2
20
R3
E1
J1
R5
E2
R1
R4
R6
R2
21
R2
E1
R3
R5
E2
R4
J1
R1
R6
22
J1
R3
R2
R5
R1
R4
J1
R6
E1
23
J1
R3
R1
R5
J1
R4
R6
E1
R2
24
R4
R2
R5
R1
R3
J1
R6
E1
E2


25
R3
R1
R5
E1
J1
J2
R4
R2
R6
26
R3
R1
R5
J1
E1
J2
R4
R2
R6
27
R3
E1
R1
R5
J2
J1
R4
R2
R6
28
R1
E1
R2
R5
J1
J2
R4
R3
R6
29
R3
E1
J1
J2
R1
R5
R4
R2
R6
30
J2
R3
J1
R5
R1
R4
E1
R2
R6