



Теорія електричних та електронних кіл

**Викладач: к.ф.-м.н., доцент
Петровський Михайло Васильович**

СумДУ

ДСК, 1 РГР.

100 балів.

Корпус **М** – **3** поверх (М307 – викладацька)

Література:

1. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Страхов С.В.*

Основы теории цепей – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с

2. *Шегедин О.І., Маляр В.С.*

Теоретичні основи електротехніки. – Львів: Магнолія2006, 2007. – 168 с.

3. *Попов В.П.*

Основы теории цепей. – М. : Высш. шк., 1985. – 496 с.

4. *Бессонов Л.А.*

Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М. : Высшая шк., 1984. – 559 с.

5. *Шебес М.Р., Каблукова М.В.*

Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: Высш. шк. , 1990. – 544 с.

Дисципліна ТЕЕК вивчає кількісні та якісні сторони електромагнітних процесів в електричних колах та електромагнітному полі.

Теорія електричних кіл вивчає електромагнітні явища в технічних системах, призначених для виробництва, передачі й розподілу електричної енергії, поширення, перетворення й переробки інформації.

Курс базується на знаннях, отриманих студентами при вивченні наступних розділів:

- фізика;
- вища математика – алгебра;
- теорії алгебраїчних і диференціальних рівнянь;
- інтегральні перетворення Фур'є та Лапласа;

План

Тема 1 Методи розрахунку кіл постійного струму

- 1.1 Основні поняття
- 1.2 Елементи схем заміщення електричних кіл
 - 1.2.1 Пасивні елементи кола
 - 1.2.2 Активні елементи
- 1.3 Розрахунок кола за законами Кірхгофа
- 1.4 Метод контурних струмів (МКС)

Тема № 1

Методи розрахунку кіл постійного струму

1.1 Основні поняття

Основні характеристики процесів, що відбуваються в електротехнічних пристроях можна описати за допомогою інтегральних понять: напруга u , струм i , електрорушійна сила E (ЕРС).

Сила струму i визначається кількістю електричного заряду q , що пройшов через поперечний переріз провідника в одиницю часу.

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} \right] = [A]$$

Напругою u називають кількість енергії W , що витрачається на переміщення одиничного заряду q з однієї точки в іншу.

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{dW}{dq} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [V]$$

Потенціал – кількість енергії, що витрачається на переміщення одиничного заряду з нескінченності в яку-небудь точку електромагнітного поля.

Звідси **напруга** – це різниця потенціалів.

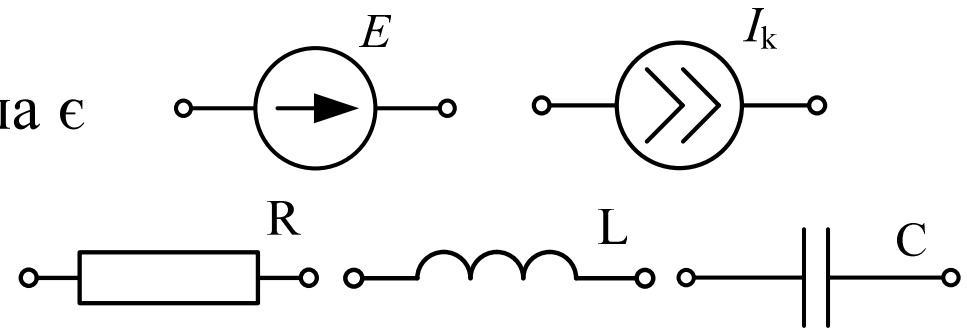
Потужність – це швидкість зміни енергії в часі:

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt};$$
$$p = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = [W]$$

1.2 Елементи схем заміщення електричних кіл

Електричним колом називають сукупність різних елементів, об'єднаних один з одним з'єднаннями або зв'язками, по яких може протікати електричний струм.

Елементами електричного кола є джерела електричної енергії, активні та реактивні опори.

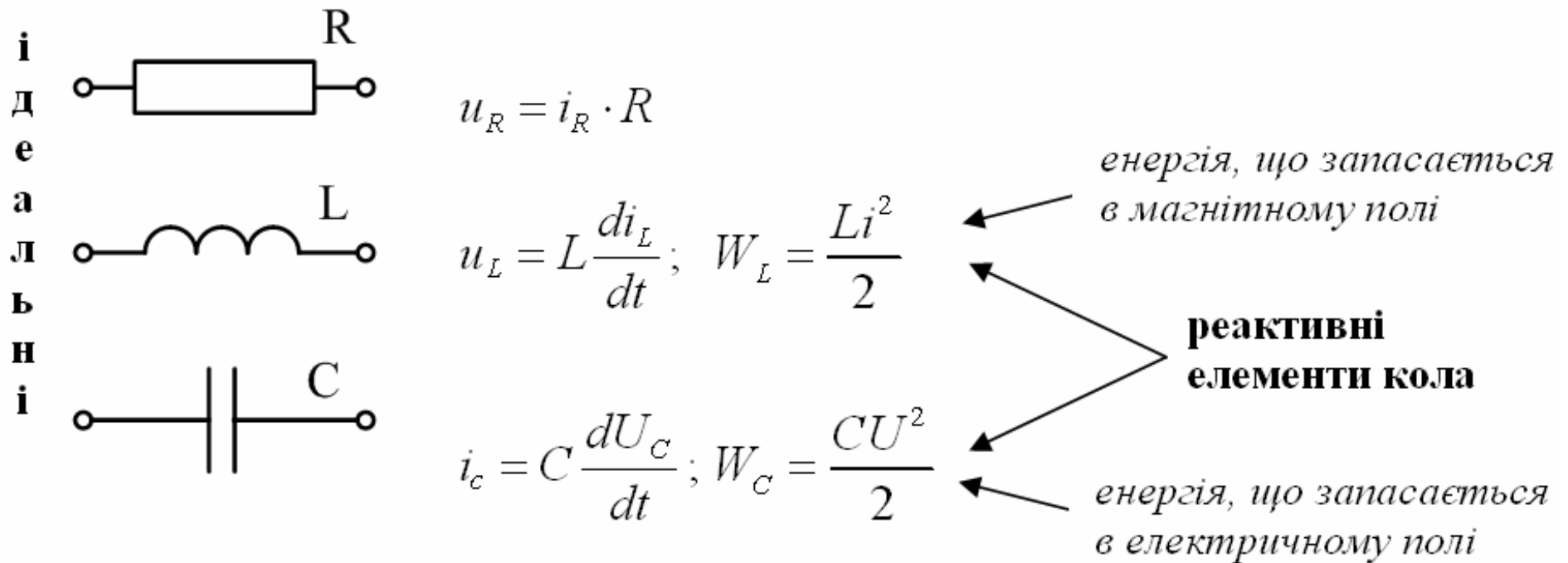


Зв'язки в електричному колі зображуються лініями та за змістом відповідають ідеальним провідникам з нульовим опором.

Електрична схема заміщення – це графічне зображення електричного кола ідеалізованими елементами, які враховують явища, що відбуваються в реальному колі.

1.2.1 Пасивні елементи кола

До *пасивних* належать елементи, у яких розсіюється (резистори) або накопичується (катушка індуктивності та конденсатор) енергія.



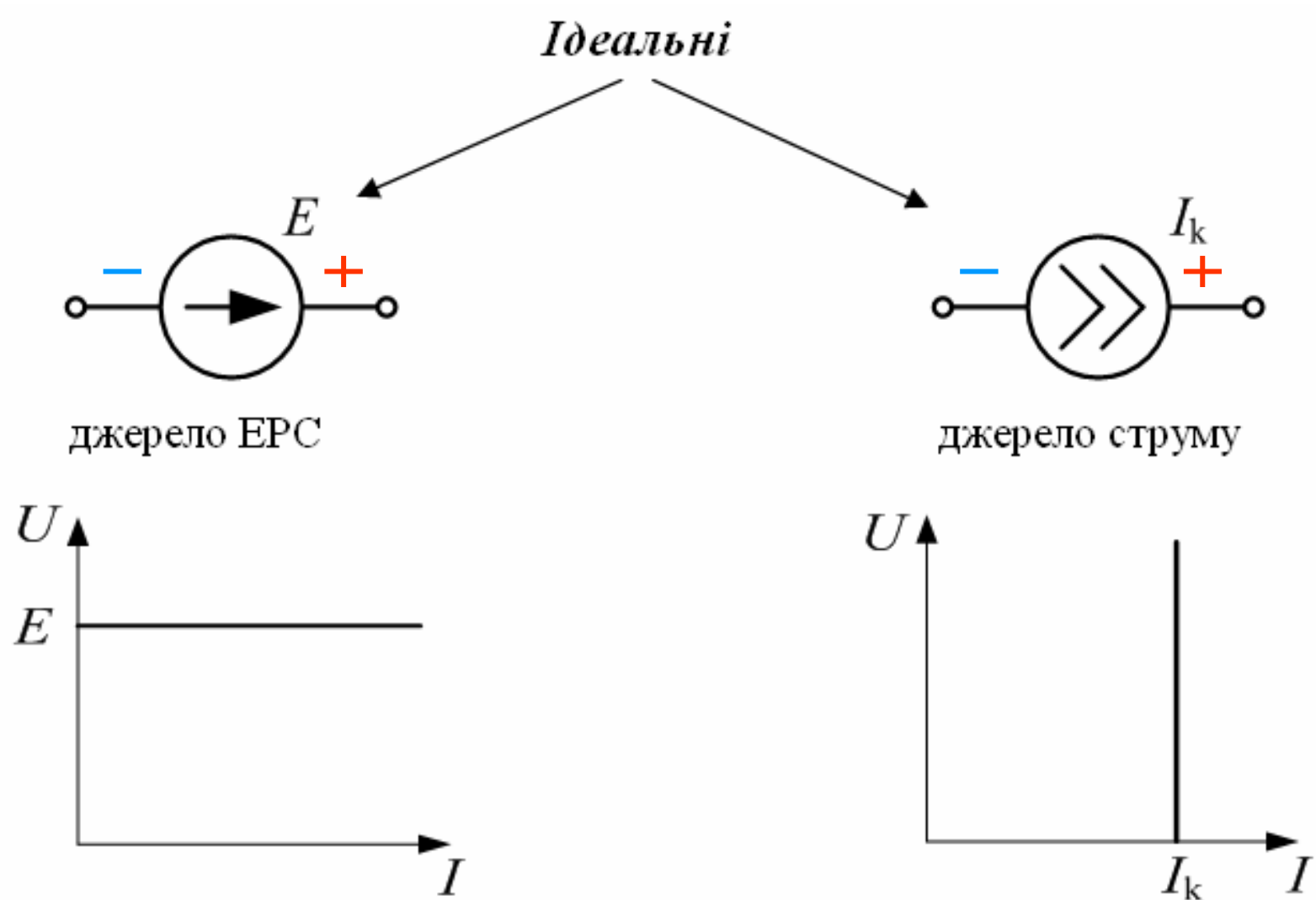
Резистором будемо називати такий елемент кола, у якому відбувається процес незворотного перетворення електричної енергії в інші її види, а накопичення енергії в електричному та магнітному полях відсутні.

Котушка індуктивності – це пасивний елемент кола, у якому відбувається процес накопичення енергії в магнітному полі, а поглинання енергії та накопичення її в електричному полі відсутні.

Конденсатор – це пасивний елемент кола, у якому відбувається процес накопичення енергії в електричному полі, а поглинання енергії та накопичення її в магнітному полі відсутні.

1.2.2 Активні елементи

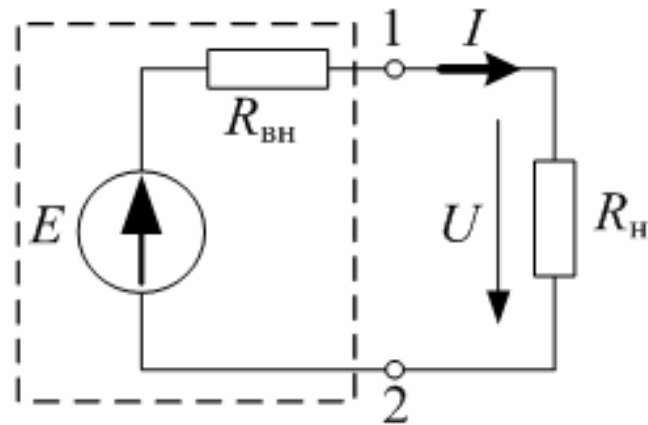
Активним називається елемент, що містить у своїй структурі джерело електричної енергії.



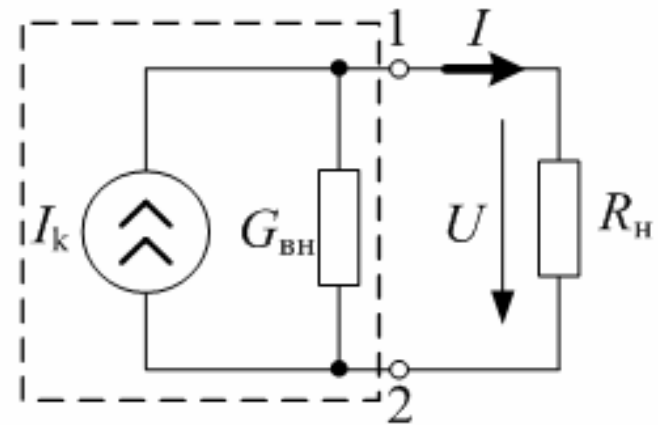
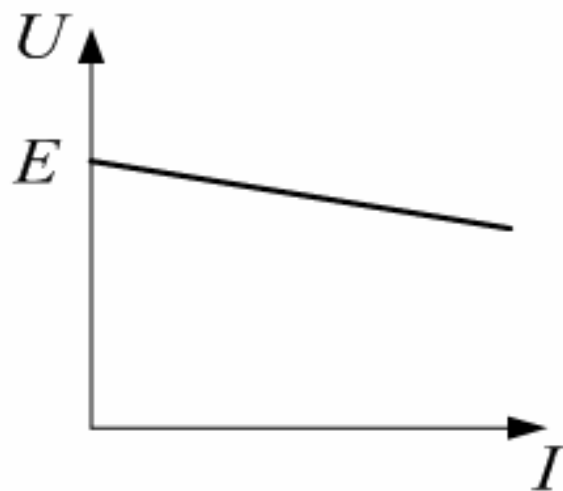
Ідеальним джерелом ЕРС (напруги) називають такий елемент кола із двома виводами, напруга на затискачах якого незмінна та не залежить від величини струму, що віддається у зовнішнє коло.

Ідеальним джерелом струму називають такий елемент кола із двома виводами, через який протікає незмінний за величиною струм незалежно від величини напруги на його затискачах.

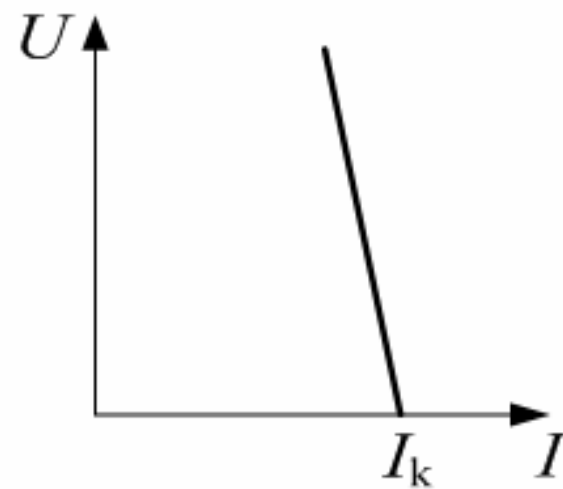
Реальні



$$U = E - IR_{BH}$$



$$I = I_k - UG_{BH}$$



У ідеального джерела ЕРС опір нескінченно малий.

У ідеального джерела струму опір нескінченно великий.

Ідеальних пристроїв у реальному житті немає.

Реальне джерело ЕРС має невеликий опір.

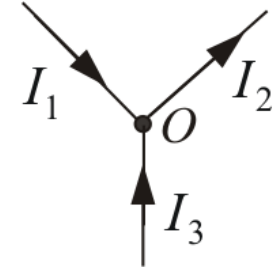
Реальне джерело струму має великий, але кінцевий опір.

При розрахунках електричних кіл для спрощення математичного опису іноді необхідно *перетворювати* джерела струму в джерела ЕРС. Це перетворення **можливо тільки для реальних джерел**. Тому резистор, включений послідовно з ідеальним джерелом ЕРС, необхідно вважати як його внутрішній опір. Відповідно для ідеального джерела струму провідність паралельної вітки приймають за внутрішню провідність джерела струму.

Вирази для еквівалентних перетворень джерел енергії:

$$E = \frac{I_k}{G_{BH}}, \quad I_k = \frac{E}{R_{BH}}, \quad G_{BH} = \frac{1}{R_{BH}}.$$

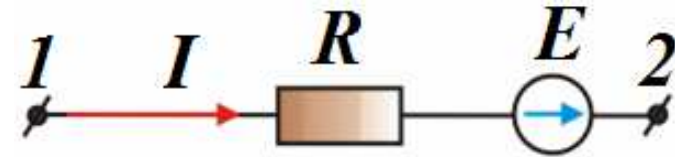
Вузлом електричного кола називають місце (крапку) з'єднання трьох і більше елементів.



Віткою називають сукупність зв'язаних елементів електричного кола між двома вузлами.

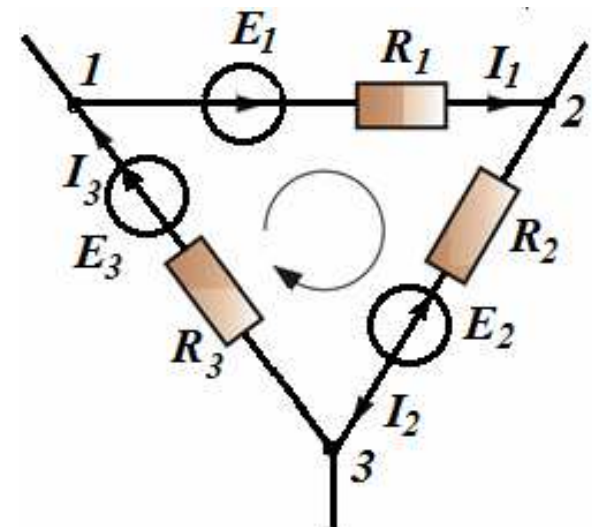
Можна сформулювати коротше.

Вітка – це ділянка з одним струмом.



Контуром (замкнутим контуром) називають сукупність віток, що утворюють шлях, при переміщенні уздовж якого ми можемо повернутися у вихідну точку, не проходячи більше одного разу по кожній вітці та по кожному вузлу.

Незалежним контуром – називається такий контур електричного кола в який входить хоча б l -на вітка, що не належить до інших контурів.



Метод перетворення схем

Складною називається електричне коло (схема), що містить не менше двох вузлів, не менше трьох гілок і не менше двох джерел енергії в різних гілках.

Правила перетворення:

- Якщо схема електричного кола містить тільки одне джерело енергії (E или I_K), то пасивна частина схеми може бути перетворена до одного еквівалентному елементу $R_{\text{ЕКВ}}$.
- Перетворення схеми починається з найвіддаленіших від джерела віток, проводиться в кілька етапів до досягнення $R_{\text{ЕКВ}}$
- Потім визначається струм джерела за законом Ома
- Струми в інших елементах вихідної схеми знаходяться в процесі зворотної розгортки схеми

1) Послідовне перетворення полягає в заміні декількох елементів (рис. 2.1), включених послідовно, одним еквівалентним (рис. 2.2).

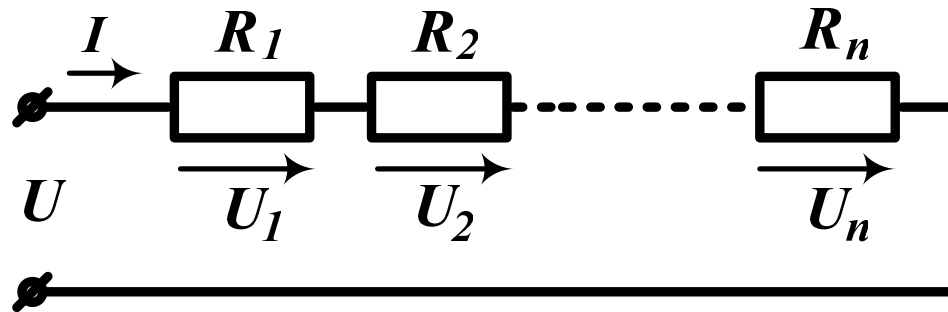


Рисунок 2.1 Початкова схема

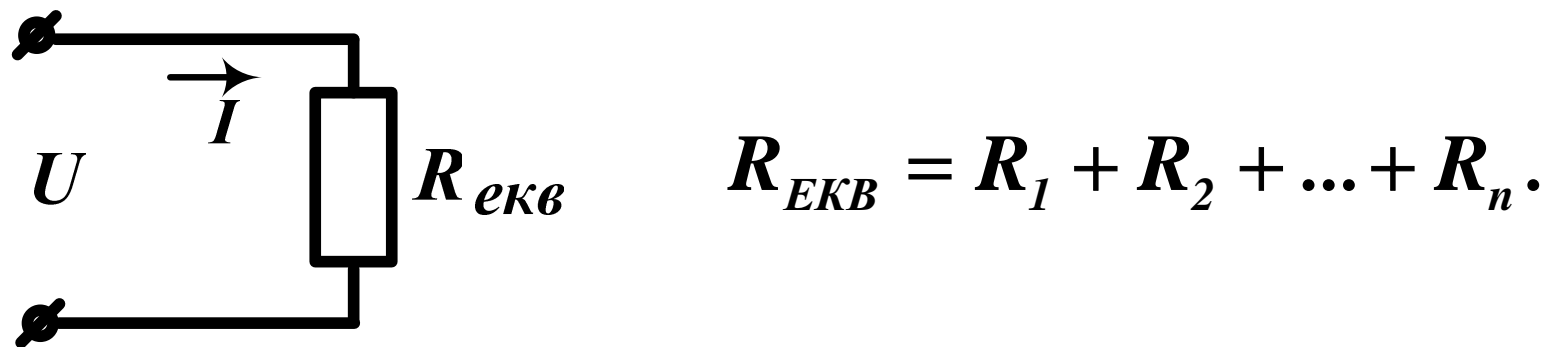


Рисунок 2.2 Змінена схема

2) Паралельне перетворення полягає в заміні декількох елементів (рис.2.3), включених паралельно, одним еквівалентним (рис.2.4).

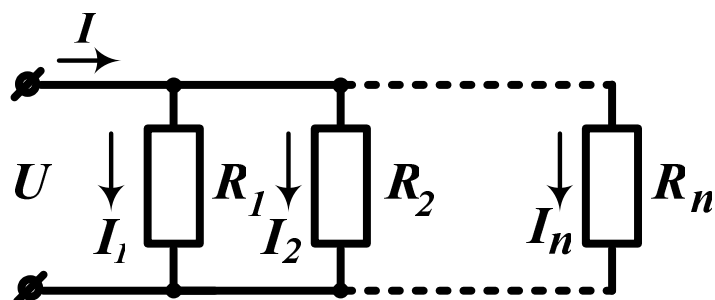


Рисунок 2.3 Початкова схема

Рівняння для схеми (рис. 2.3) записується за першим законом Кірхгофа

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

$$\frac{U}{R_{EKB}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n},$$

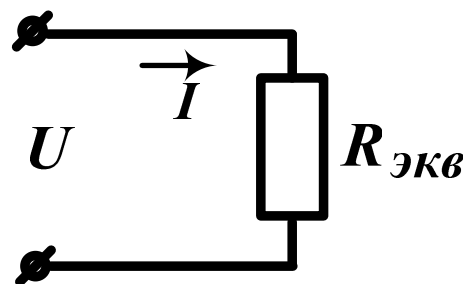
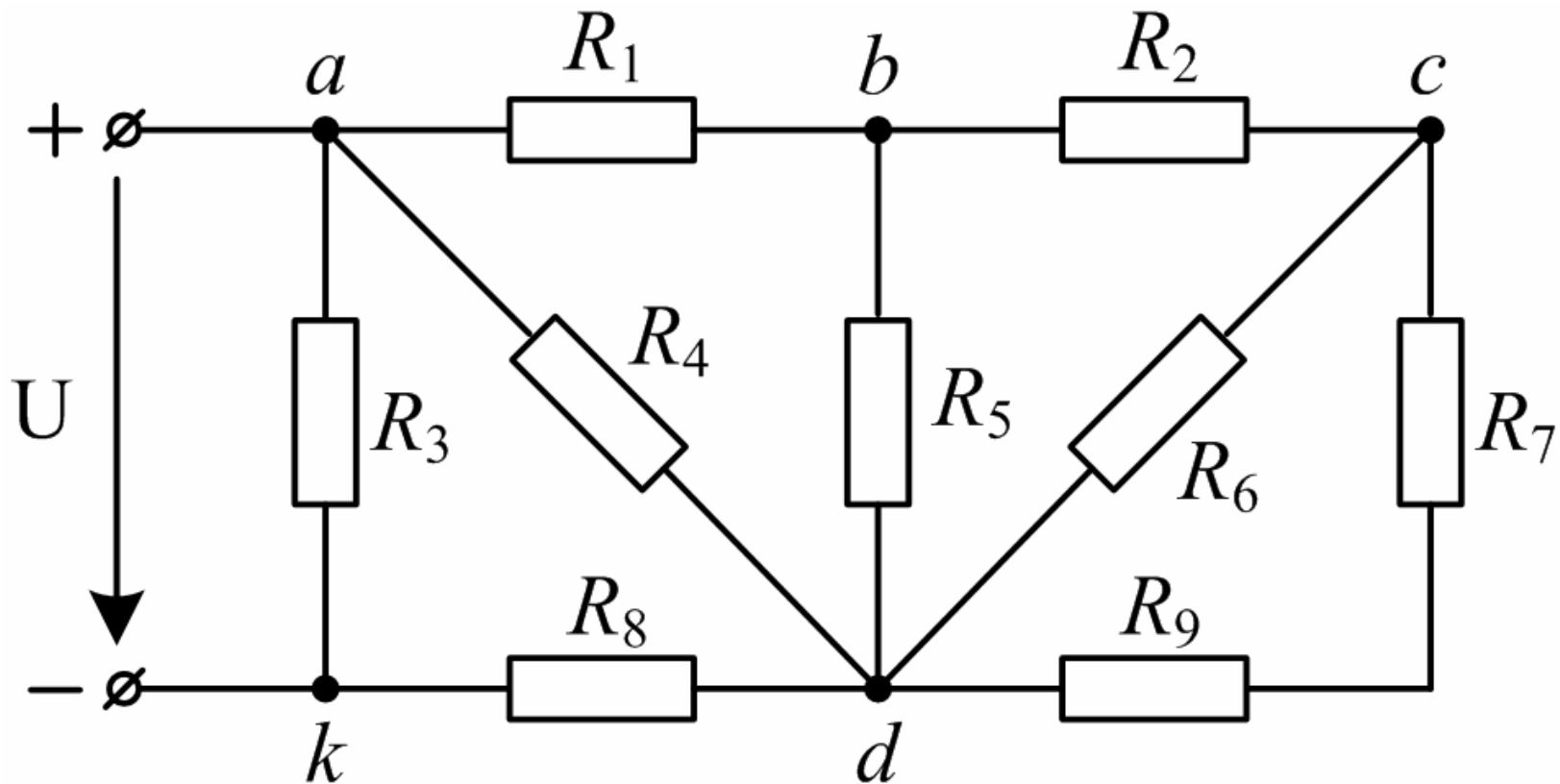


Рисунок 2.4 Змінена схема

$$\frac{1}{R_{EKB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$



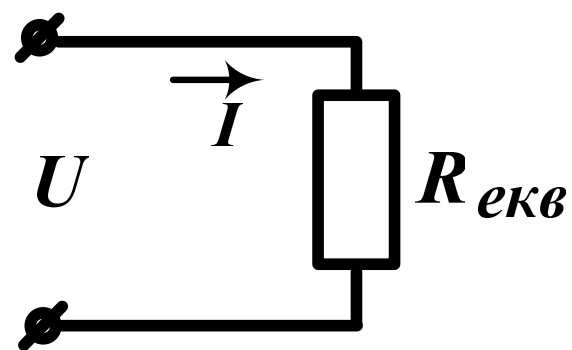
$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_7 = R_9 = 10 \text{ Ом}$$

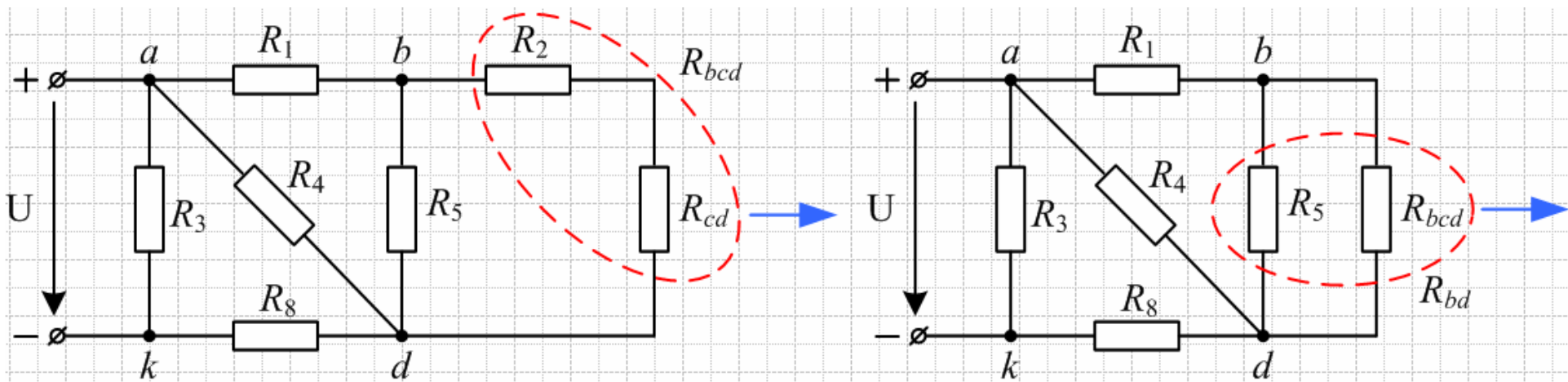
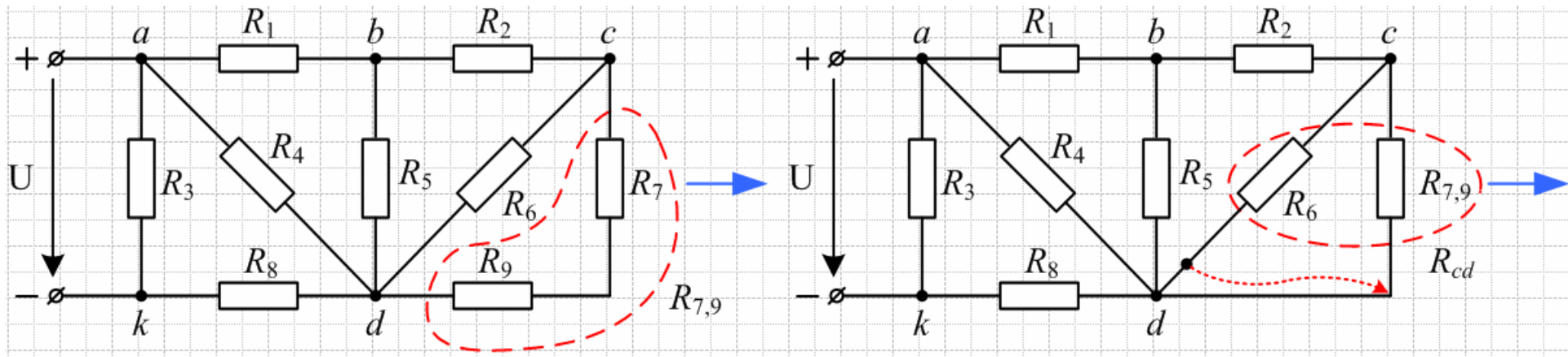
$$R_3 = R_4 = 15 \text{ Ом}$$

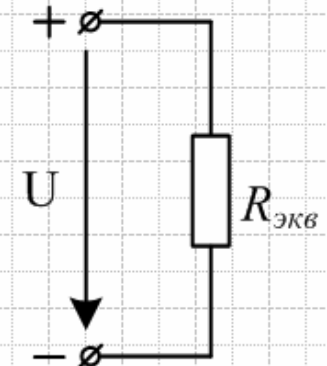
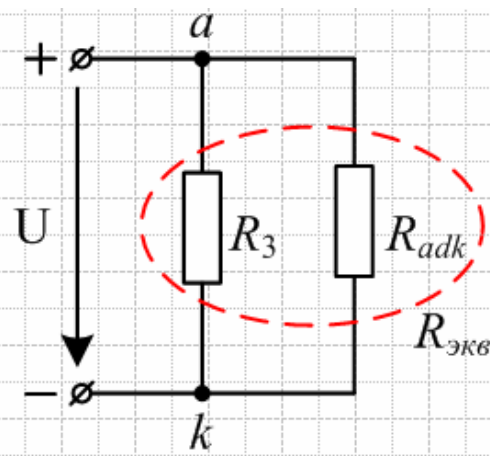
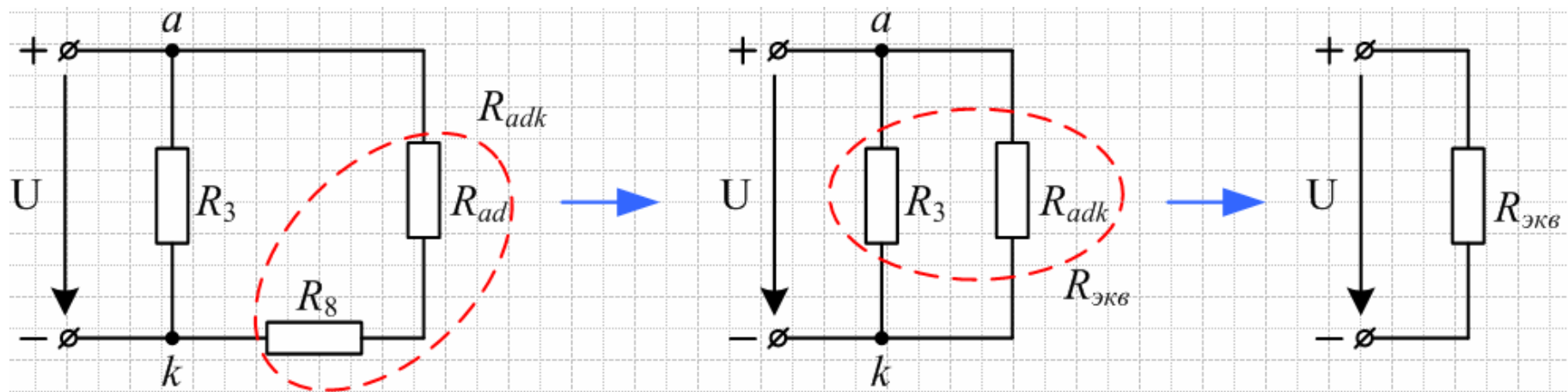
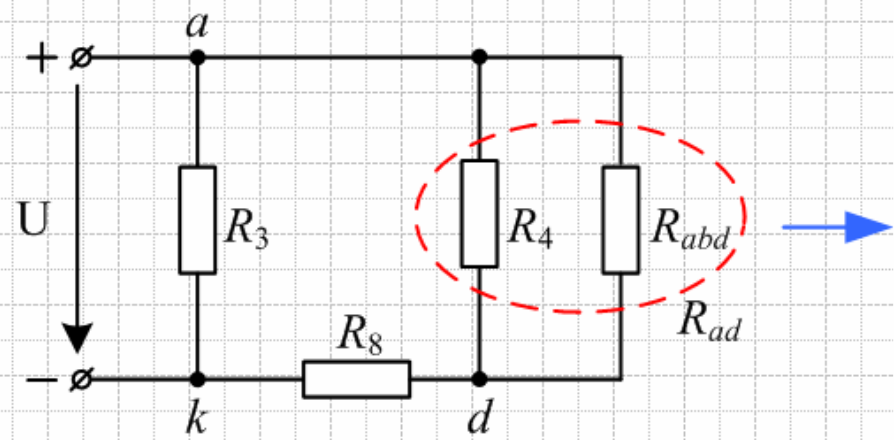
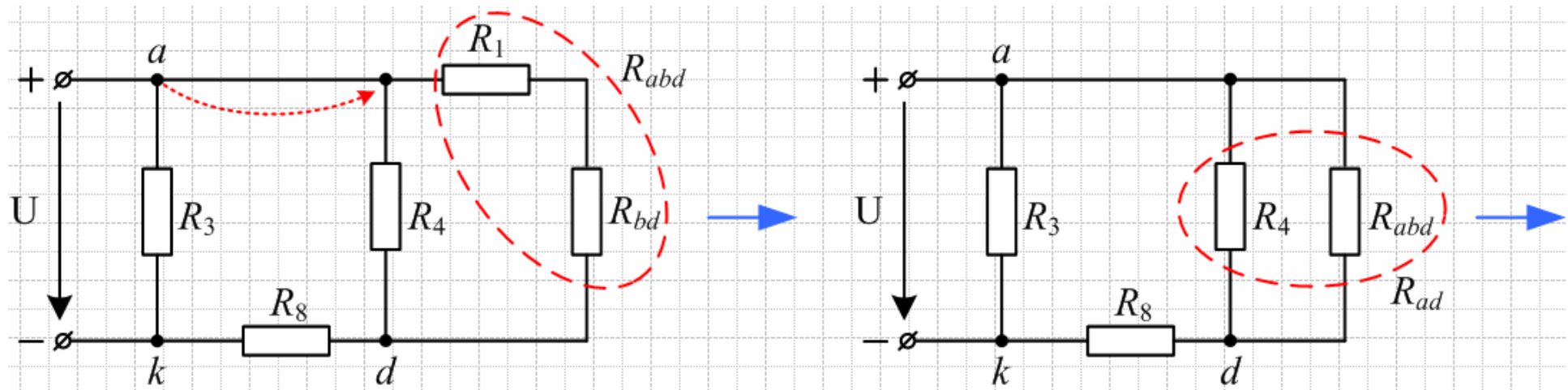
$$R_5 = R_6 = 20 \text{ Ом}$$

$$R_8 = 7.5 \text{ Ом}$$



$R_{\text{екв}} - ?$

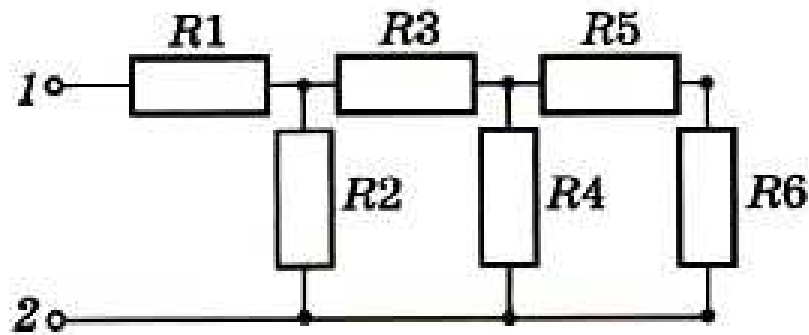




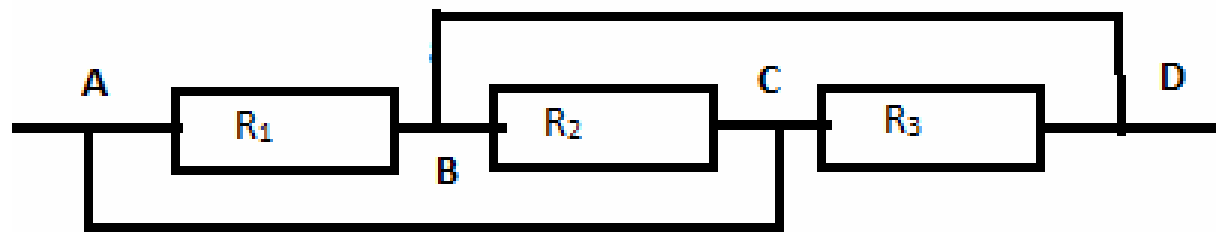
$$R_{\text{экв}} = 7,5 \text{ Ом}$$

Контроль - 1

- Розрахуйте $R_{\text{екв}}$ для двох схем



8 ХВИЛИН



1.3 Розрахунок кола за законами Кірхгофа

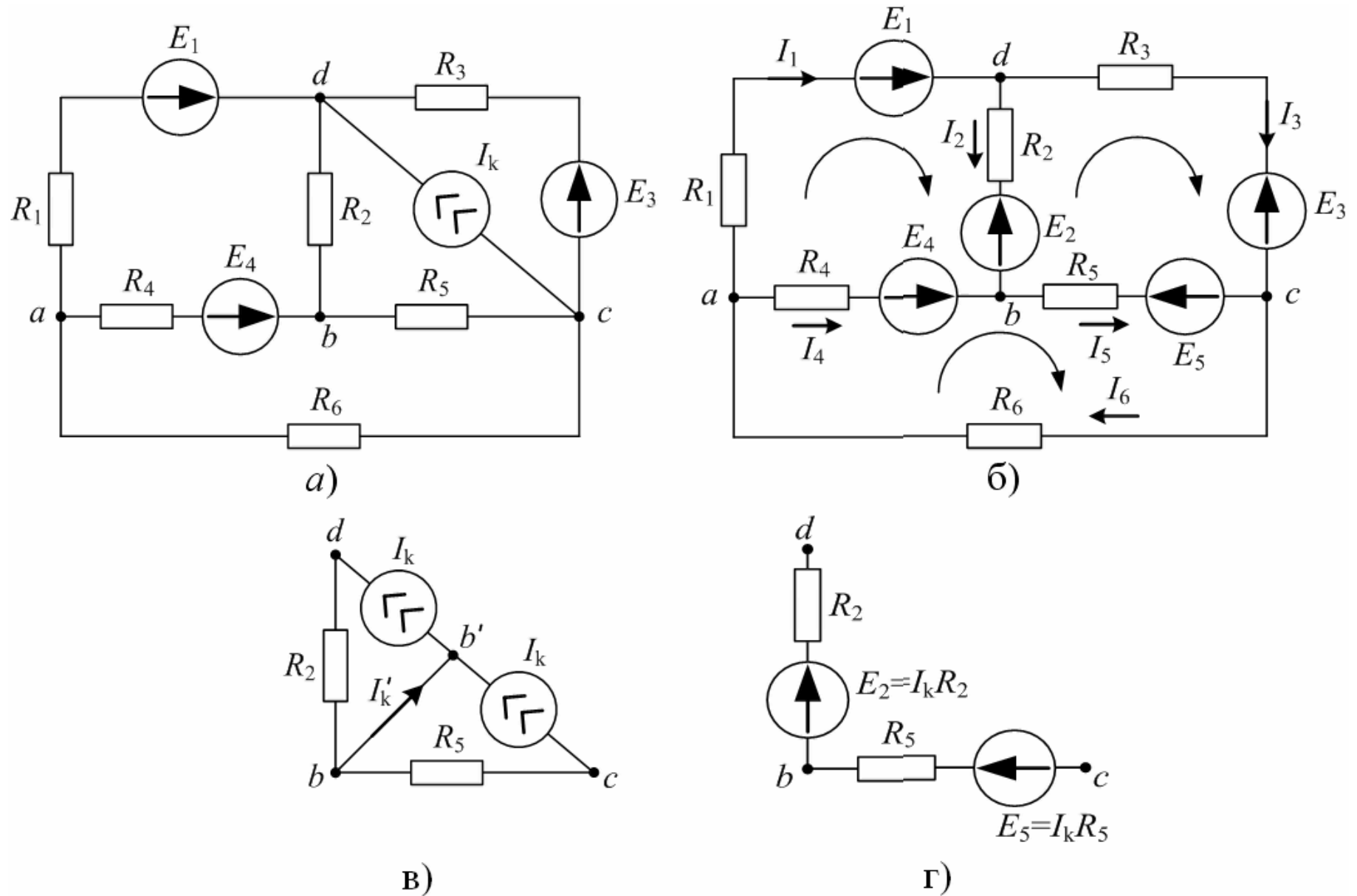


Рис. 1

I закон Кірхгофа (баланс струмів) – алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю.

$$\sum_i I_i = 0$$

- ! У рівняннях, складених за першим законом Кірхгофа, струми, спрямовані до вузла, записуються з позитивними знаками, а спрямовані від вузла – з негативними.
-

$$a: -I_1 - I_4 + I_6 = 0;$$

$$b: I_2 + I_4 - I_5 = 0;$$

$$c: I_5 + I_3 - I_6 = 0.$$

II закон Кірхгофа (баланс напруг) – у будь-якому замкненому контурі алгебраїчна сума напруг на всіх ділянках з опорами, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС цього контуру.

$$\sum_i I_i R_i = \sum_i E_i .$$

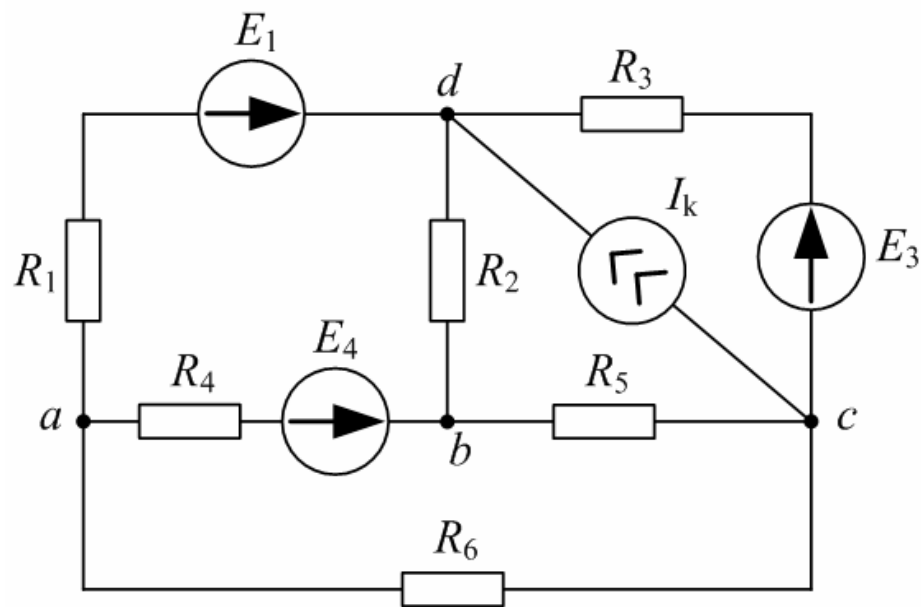
! Якщо напрямок обходу контуру *збігається* з напрямком струму на елементі кола, то спадання напруги на цьому елементі береться зі знаком «плюс».

• Якщо напрямок обходу контуру *збігається* з напрямком дії ЕРС, то значення ЕРС ставиться зі знаком «плюс».

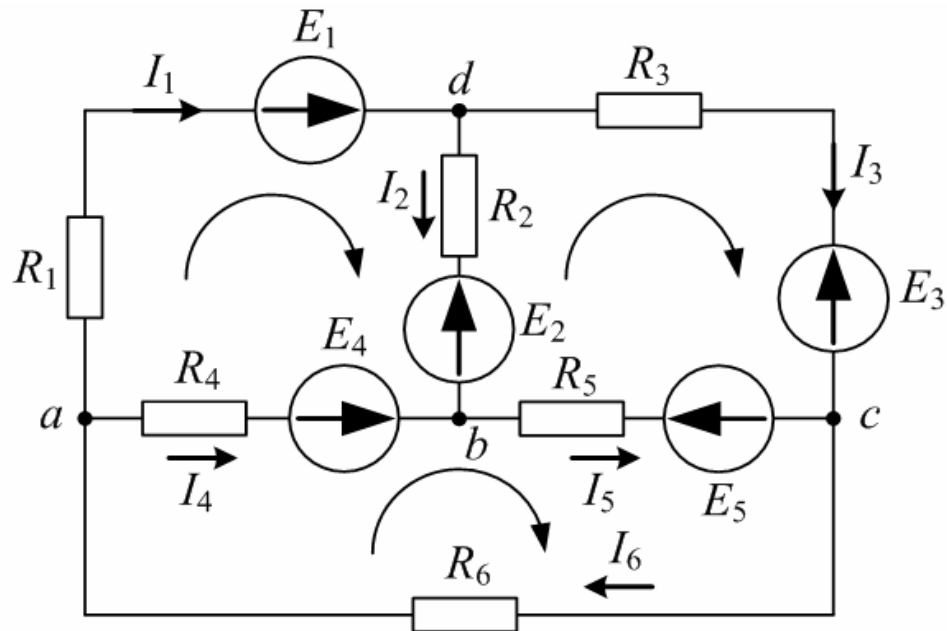
$$I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_4 R_4 = E_1 - E_2 - E_4 ;$$

$$I_3 R_3 - I_5 R_5 - I_2 R_2 = -E_3 + E_5 + E_2 ;$$

$$I_4 R_4 + I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_4 - E_5 .$$

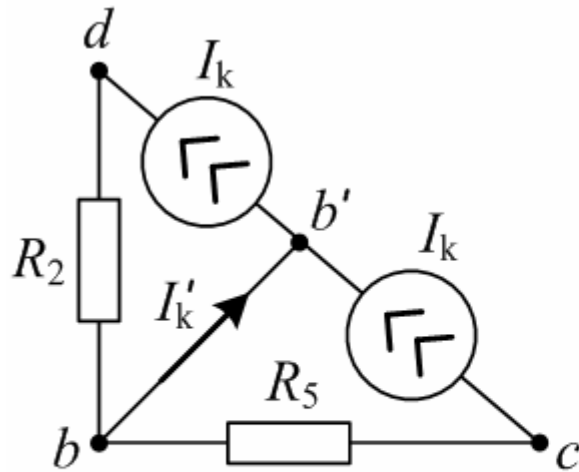


а)

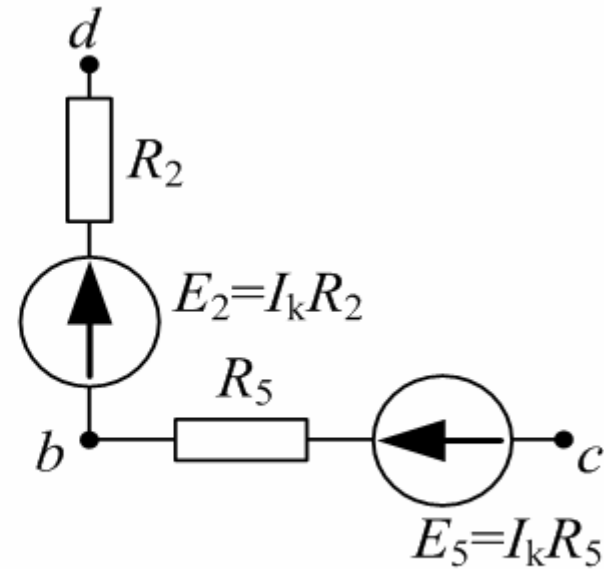


б)

Еквівалентна схема (рис. 1б) отримана шляхом перетворення джерела струму I_k в джерела ЕРС E_2 та E_5 , при цьому струми в вітках з опорами R_2 та R_5 не дорівнюють відповідним струмам у вітках заданої схеми (рис. 1а) і відрізняються від них на величину струму I_k джерела струму.



в)

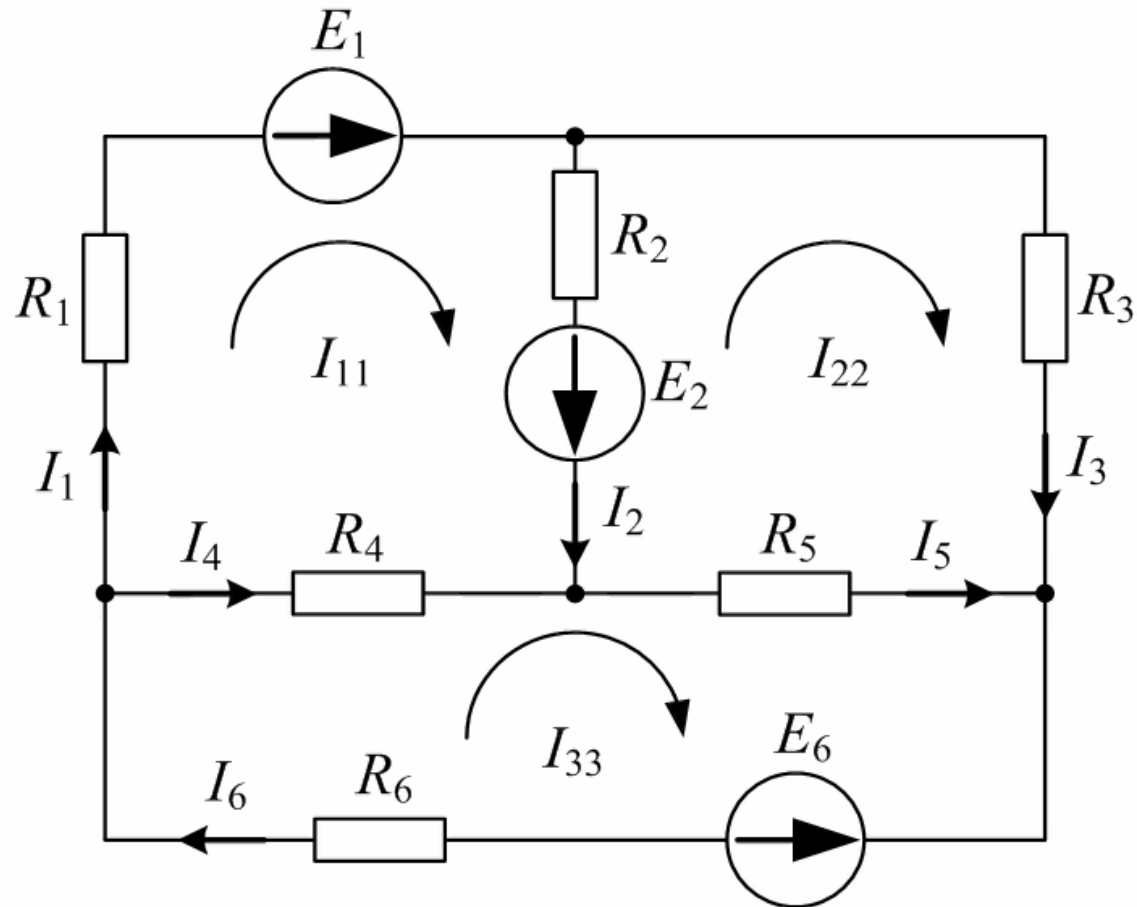


г)

Заміна джерела струму I_k двома еквівалентними джерелами напруги E_2 та E_5 (рис. 1г) заснована на попередньому перетворенні одного джерела струму, включеного до вузлів d і c (рис. 1а) двома джерелами струму, включеними до вузлів d і b , b і c (рис. 1в).

! Якщо в результаті розрахунку для струму виходить негативне значення, то це значить, що дійсний напрямок струму не збігається з обраним позитивним напрямком (протилежно довільно обраному напрямку).

1.4 Метод контурних струмів (МКС)



$$\begin{cases} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} = E_{11} \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} = E_{22} \\ R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} = E_{33} \end{cases} \quad (*)$$

R_{11}, R_{22}, R_{33} – *власні* опори контурів;

$R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, R_{31}, R_{32}$ – *взаємні* опори віток між контурами;

E_{11}, E_{22}, E_{33} – *контурні* ЕРС.

Якщо напрямки контурних струмів у суміжних вітках *протилежні*, то взаємні опори беруться зі знаком «мінус».

Контурна ЕРС визначається алгебраїчною сумою ЕРС по яких проходить контурний струм.

- ! Якщо напрямки дії ЕРС вітки та відповідного контурного струму *збігаються*, то у виразі для контурної ЕРС її значення ставиться зі знаком «плюс».

$$\begin{array}{lll}
R_{11} = R_1 + R_2 + R_4; & R_{12} = R_{21} = -R_2; & E_{11} = E_1 + E_2; \\
R_{22} = R_2 + R_3 + R_5 & R_{23} = R_{32} = -R_5; & E_{22} = -E_2; \\
R_{33} = R_4 + R_5 + R_6; & R_{13} = R_{31} = -R_4; & E_{33} = -E_6.
\end{array}$$

У результаті розв'язання системи рівнянь по МКС (*) на підставі знайдених контурних струмів визначають струми в вітках:

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

Струми в суміжних вітках дорівнюють алгебраїчним суммам контурних струмів.

Запишемо рівняння (*) в матричній формі:

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} R \times I &= E \\ R^{-1} \times R \times I &= R^{-1} \times E \\ I &= R^{-1} \times E = G \times E \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} I_{11} &= G_{11}E_{11} + G_{12}E_{22} + G_{13}E_{33} \\ I_{22} &= G_{21}E_{11} + G_{22}E_{22} + G_{23}E_{33} \\ I_{33} &= G_{31}E_{11} + G_{32}E_{22} + G_{33}E_{33} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= G_{11}E_{11} + G_{12}E_{22} + G_{13}E_{33} = G_{11}(E_1 + E_2) + G_{12}(-E_2) + G_{13}(-E_6) = \\ &= E_1G_{11} + (G_{11} - G_{12})E_2 - G_{13}E_6 \end{aligned}$$

Аналіз отриманого рівняння дозволяє зробити висновок, що струм будь-якої вітки схеми є однорідною лінійною функцією від всіх ЕРС схеми.

1.5 Принцип накладення

Струм будь-якої вітки схеми визначається алгебраїчною сумою струмів, що викликаються кожною з ЕРС схеми окремо.

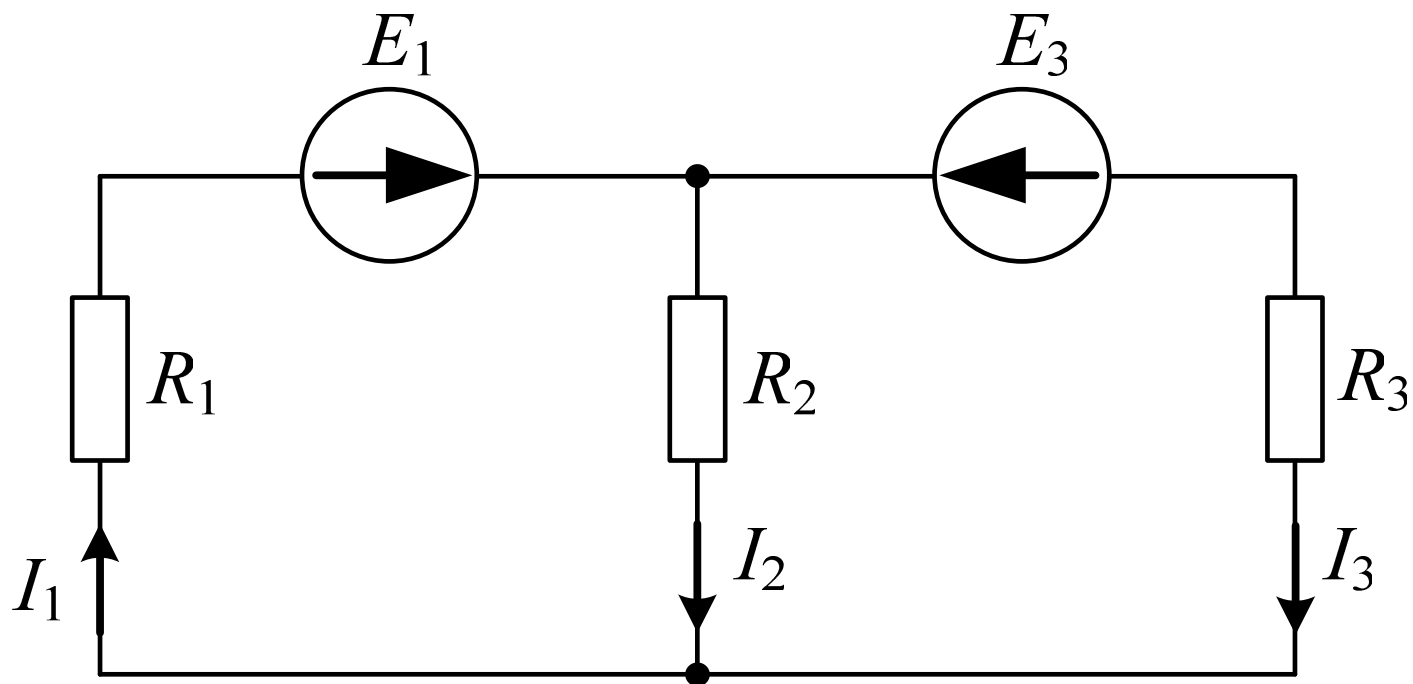
Метод накладення – це принцип для розрахунку струму будь-якої вітки в схемі з декількома джерелами ЕРС.

Методика розрахунку:

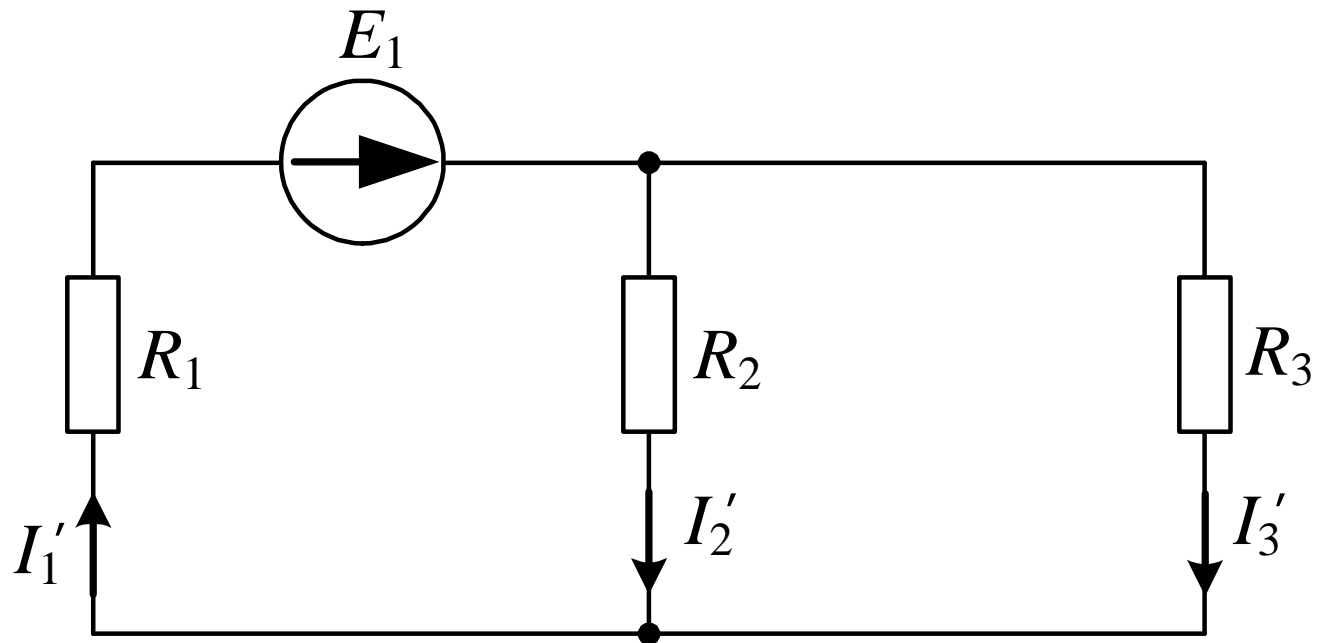
1. По черзі приймають такими, що дорівнюють *нулю* всі ЕРС джерел схеми (зберігаючи в схемі їхні внутрішні опори) крім однієї ЕРС.
2. Визначають часткові струми віток при дії кожної з ЕРС схеми окремо.
3. Результуючі струми вихідної схеми визначаються алгебраїчною сумою знайдених часткових струмів.

▲ Приклад

Визначити струми в усіх вітках схеми використовуючи принцип накладення.



1) Приймаємо $E_3 = 0$.

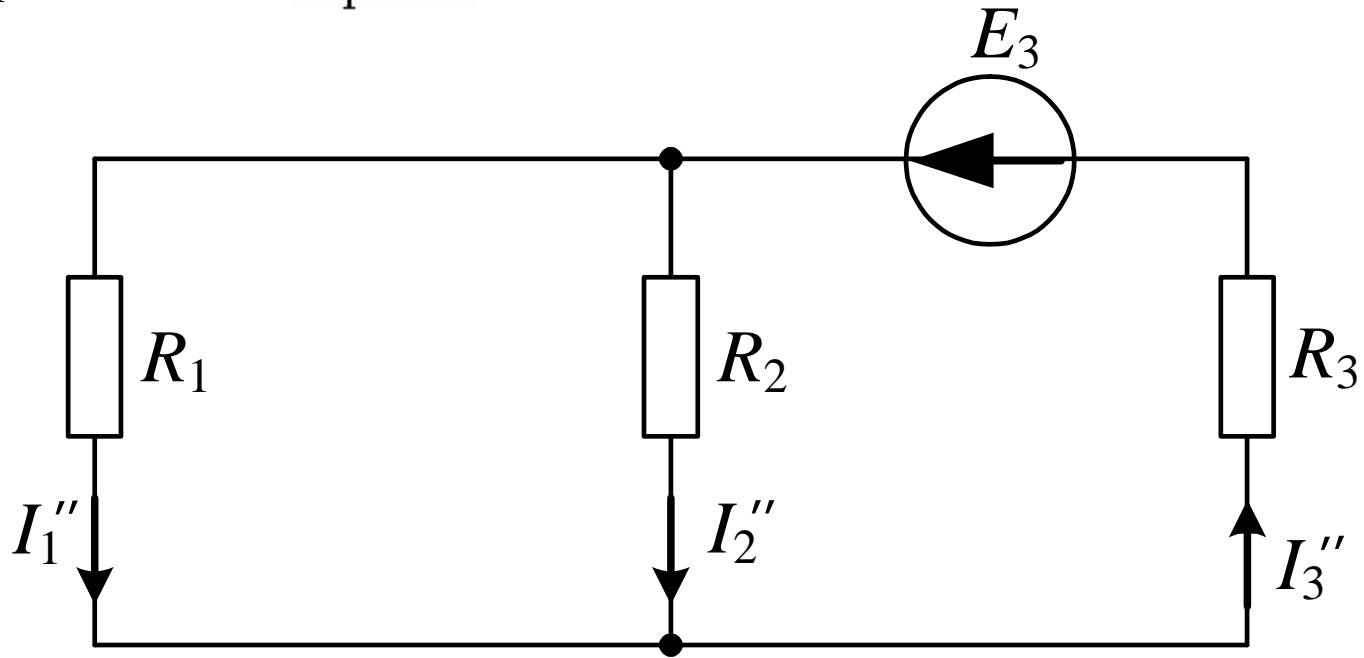


$$I_1' = \frac{E_1}{R'_{\text{BX}}}; \quad R'_{\text{BX}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3};$$

$$I_2' = I_1' \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \frac{1}{R_2} = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3};$$

$$I_3' = I_1' \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \frac{1}{R_3} = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

2) Приймаємо $E_1 = 0$.

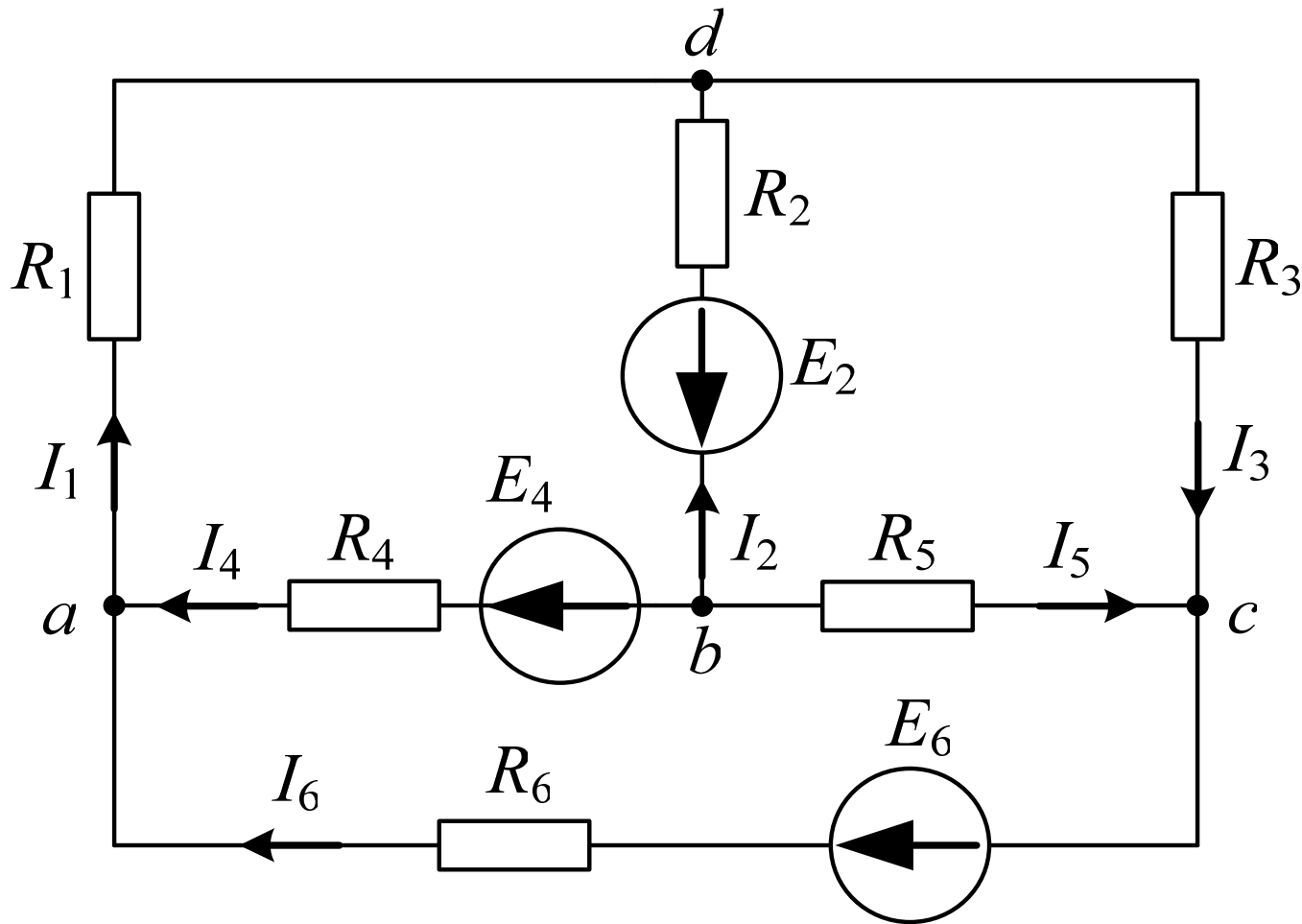


$$I_3'' = \frac{E_3}{R_{\text{BX}}''}; \quad R_{\text{BX}}'' = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$

$$I_1'' = I_3'' \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad I_2'' = I_3'' \frac{R_1}{R_1 + R_2};$$

$I_1', I_2', I_3', I_1'', I_2'', I_3''$ – часткові струми.

1.6 Метод вузлових потенціалів (МВП)



Приймають потенціал одного з вузлів рівним нулю $\varphi_d = 0$.

Таке допущення не змінює умов задачі, тому що струм у кожній вітці залежить не від абсолютних значень потенціалів вузлів, до яких приєднана вітка, а від різниці потенціалів між кінцями вітки.

$$\begin{cases} G_{aa}\varphi_a + G_{ab}\varphi_b + G_{ac}\varphi_c = I_{aa} \\ G_{ba}\varphi_a + G_{bb}\varphi_b + G_{bc}\varphi_c = I_{bb} \\ G_{ca}\varphi_a + G_{cb}\varphi_b + G_{cc}\varphi_c = I_{cc} \end{cases}$$

G_{aa}, G_{bb}, G_{cc} – власні провідності вузлів, що дорівнюють сумі провідностей віток приєднаних до вузлів $G_{aa} = \sum G_i$;

$$G_{aa} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6};$$

$$G_{bb} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5};$$

$$G_{bc} = G_{cb} = -\frac{1}{R_5}.$$

$G_{ab}, G_{ba}, G_{bc}, G_{cb}, G_{ac}, G_{ca}$ – взаємні провідності між вузлами, що дорівнюють сумі провідностей віток, що з'єднують відповідні вузли;

$$G_{ab} = G_{ba} = -\frac{1}{R_4}; \quad G_{ac} = G_{ca} = -\frac{1}{R_6}; \quad G_{bc} = G_{cb} = -\frac{1}{R_5}.$$

I_{aa}, I_{bb}, I_{cc} – вузлові струми, що дорівнюють алгебраїчній сумі струмів що створюються ЕРС у вітках приєднаних до цього вузла $I_{aa} = \sum E_i G_i + \sum I_{ki}$

$$I_{aa} = \frac{E_4}{R_4} + \frac{E_6}{R_6}; \quad I_{bb} = \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_4}{R_4}; \quad I_{cc} = -\frac{E_6}{R_6}.$$

! При записі виразу для вузлового струму, ЕРС присвоюється знак «плюс» якщо вона спрямована в розглядаємий вузол, при цьому всім взаємним провідностям рівнянь присвоюється знак «мінус».

Використовуючи *узагальнений закон Ома* для ділянки кола знаходимо струми в вітках:

$$I = I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum E}{R_{ab}} = \frac{U_{ab} + \sum E}{R_{ab}},$$

где

$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ – різниця потенціалів або напруга між виводами розглядаємої ділянки, що взяті за обраним напрямком струма;

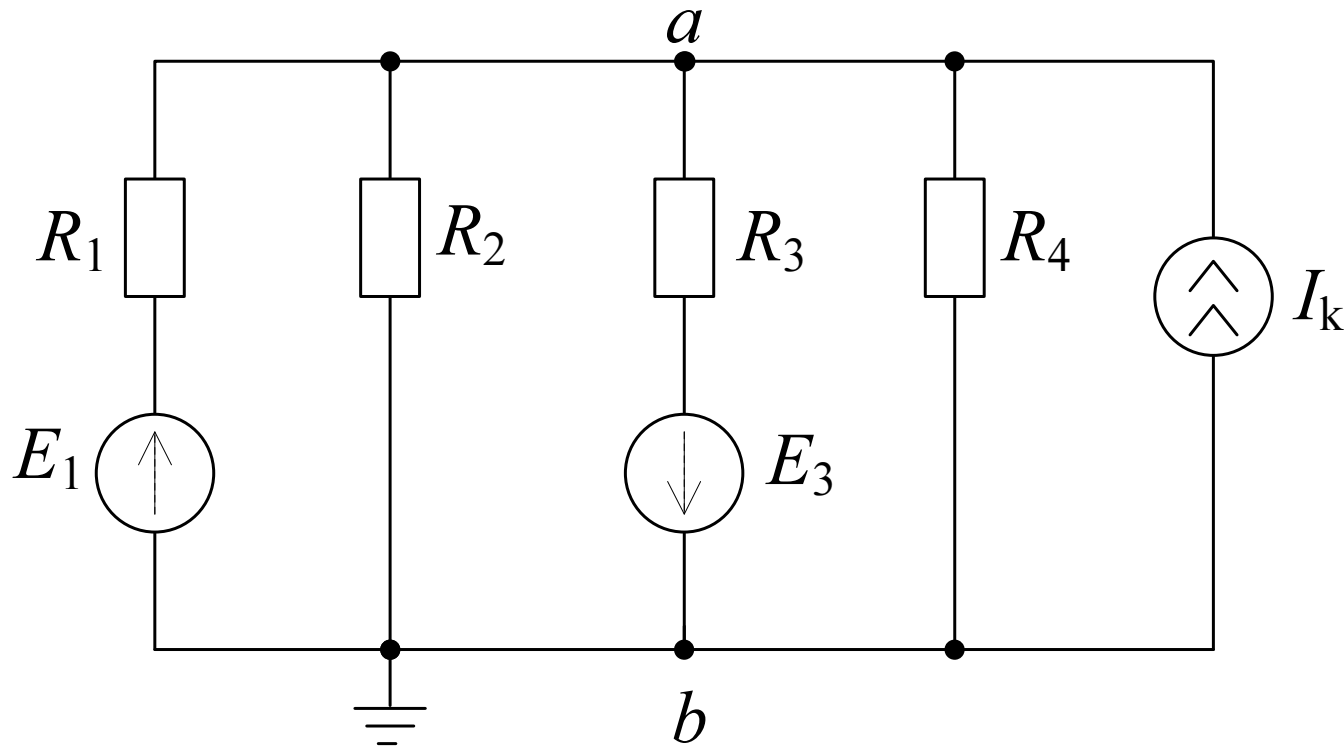
$\sum E$ – алгебраїчна сума ЕРС, що діють на тій же ділянці, причому кожна ЕРС, напрямок дії якої збігається з позитивним напрямком струму, записується з позитивним знаком, а в протилежному випадку – з негативним;

$R_{ab} = \sum R$ – сумарний опір ділянки схеми.

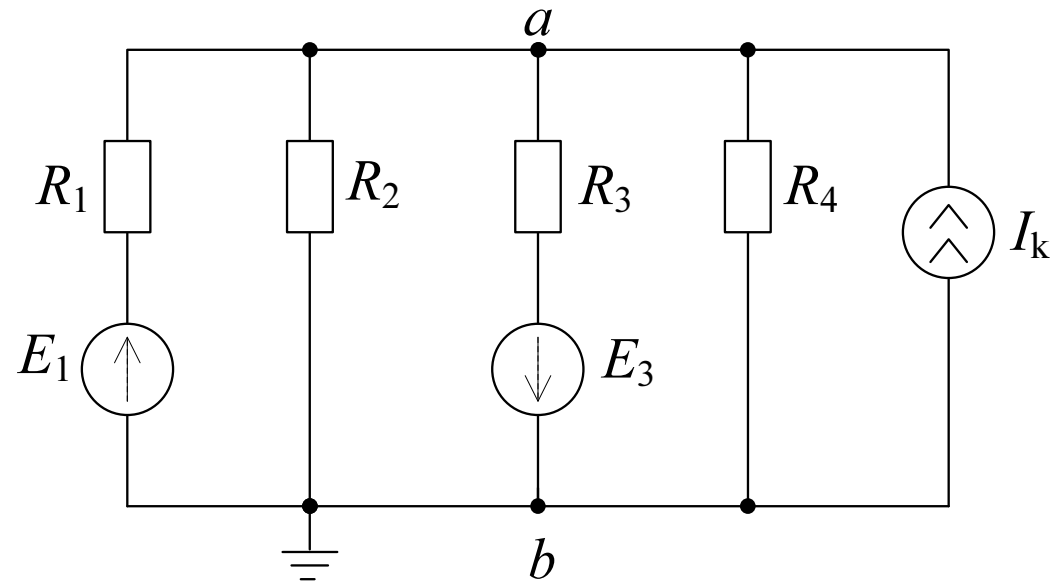
$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_d}{R_1}; I_2 = \frac{\varphi_b - \varphi_d - E_2}{R_2}; I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_a + E_4}{R_4}; I_6 = \frac{\varphi_c - \varphi_a + E_6}{R_6}.$$

1.7 Метод двох вузлів

Розглянемо застосування МВП для окремого випадку схеми із двома вузлами та довільним числом віток, всі або частина яких містять джерела ЕРС.



Приймаємо потенціал одного з вузлів таким, що дорівнює нулю $\varphi_b = 0$.



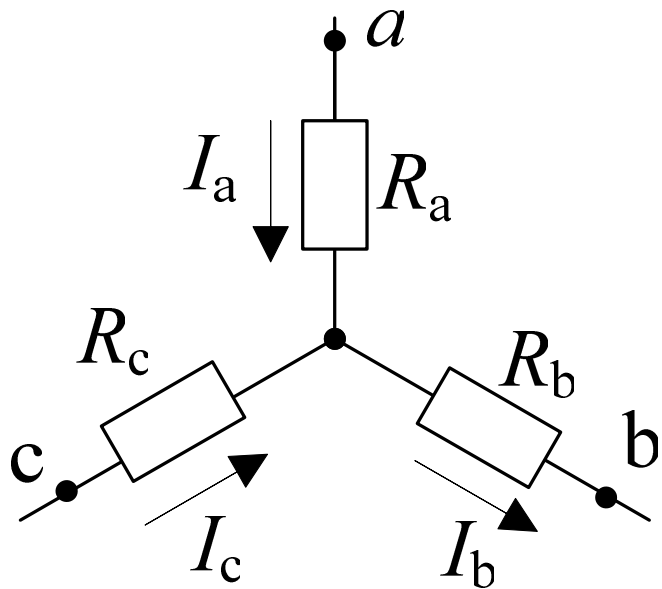
$$G_{aa}\varphi_a = I_{aa};$$

$$\varphi_a = \frac{I_{aa}}{G_{aa}} = \frac{E_1 G_1 - E_3 G_3 + I_k}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4};$$

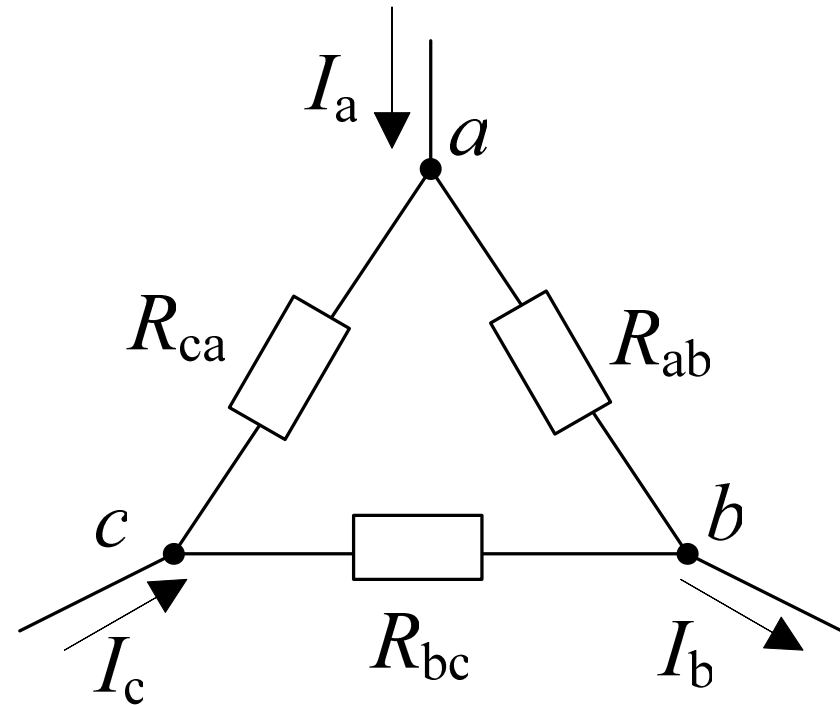
$$G_1 = \frac{1}{R_1}; \quad G_2 = \frac{1}{R_2}; \quad G_3 = \frac{1}{R_3}; \quad G_4 = \frac{1}{R_4};$$

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = \frac{\sum E_i G_i + \sum I_{ki}}{\sum G_i} \text{ — формула методу двох вузлів.}$$

1.8 Еквівалентні перетворення кіл

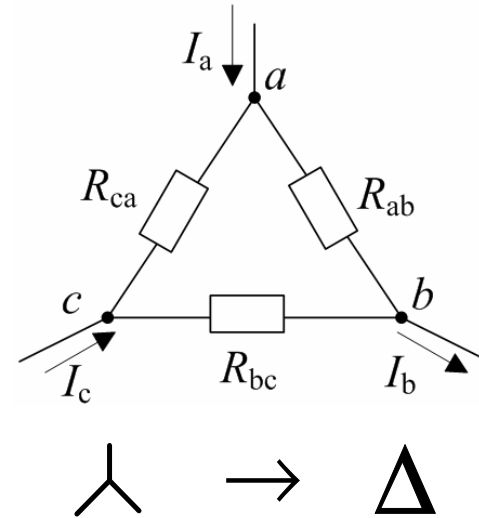
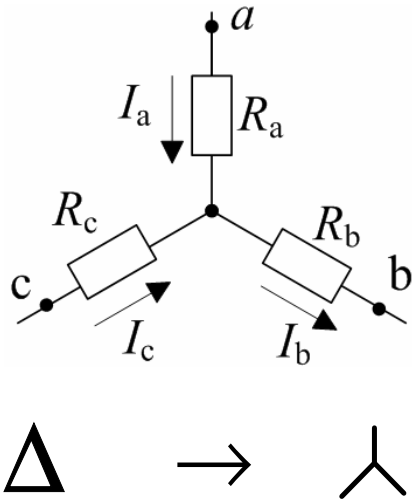


«зірка»



«трикутник»

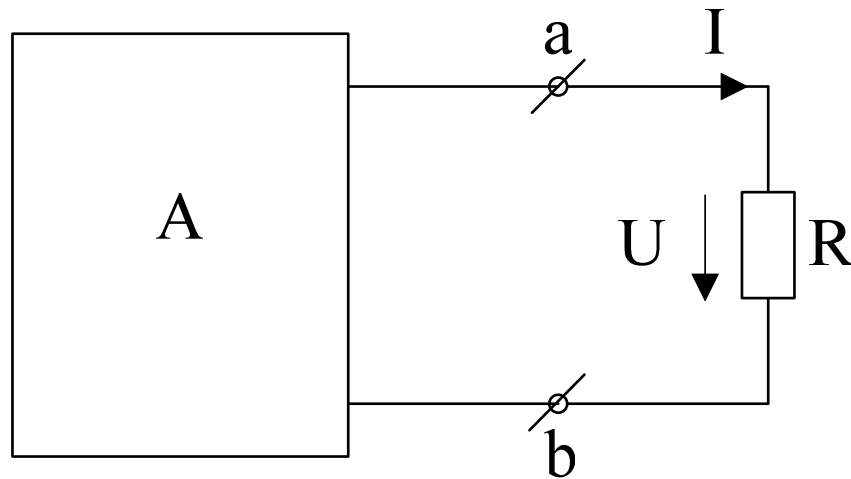
Формули для перетворення:



$$\left\{ \begin{array}{l} R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{bc} + R_{ab} + R_{ca}} \\ R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{bc} + R_{ab} + R_{ca}} \\ R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{bc} + R_{ab} + R_{ca}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \\ R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}; \\ R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}; \end{array} \right.$$

1.9 Заміна активного двополюсника еквівалентним джерелом



Під активним двополюсником розуміють схему яка містить як пасивні так і активні елементи та має 2 зовнішніх затискачі (рис. 9а).

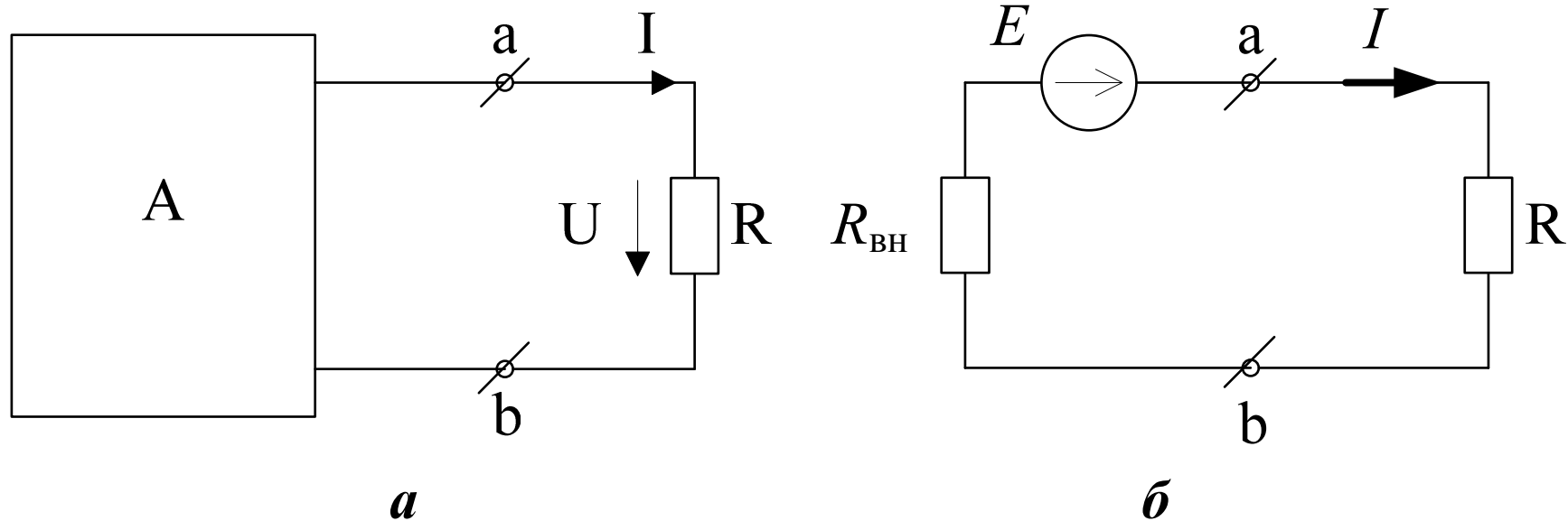


Рис 9

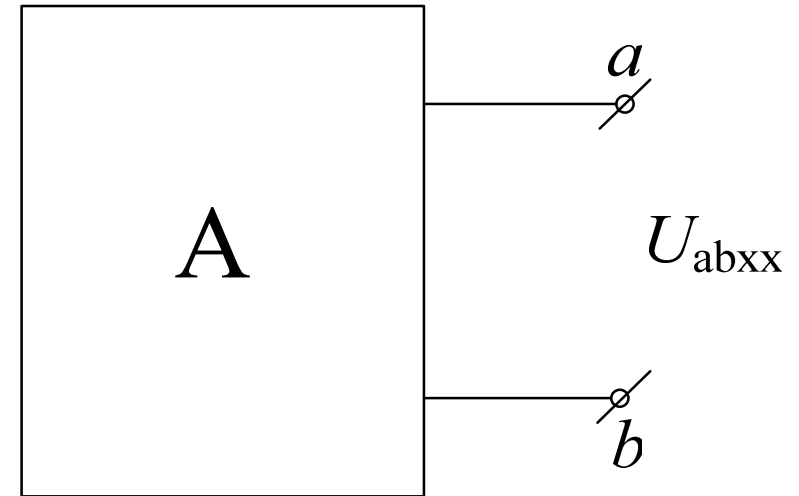
Теорема Гельмгольца - Тевенена:

Будь-який активний двополюсник (рис. 9а) можна представити реальним джерелом ЕРС із внутрішнім опором (рис. 9б).

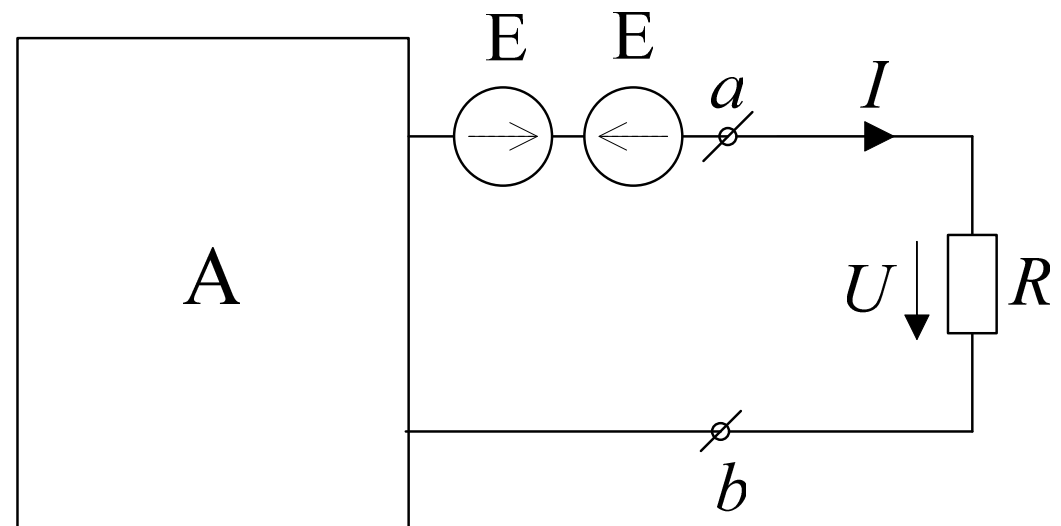
Розглянемо режим холостого ходу.

Виміряємо напругу U_{abxx} холостого ходу.

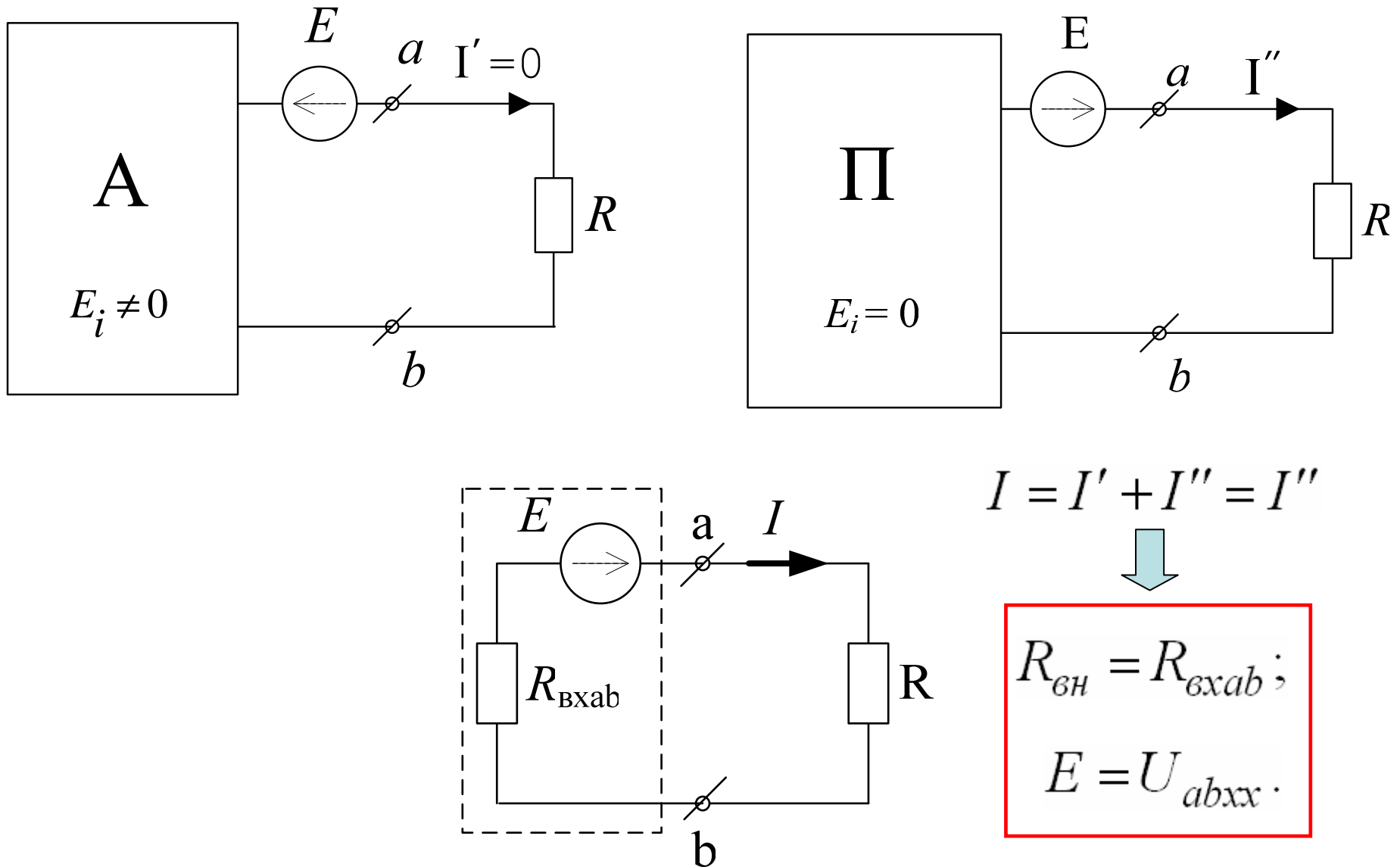
Створимо режим холостого ходу, відключивши від клем a і b вітку із резистором опором R (рис.10а) і виміряємо напругу U_{abxx} на клеммах a і b .



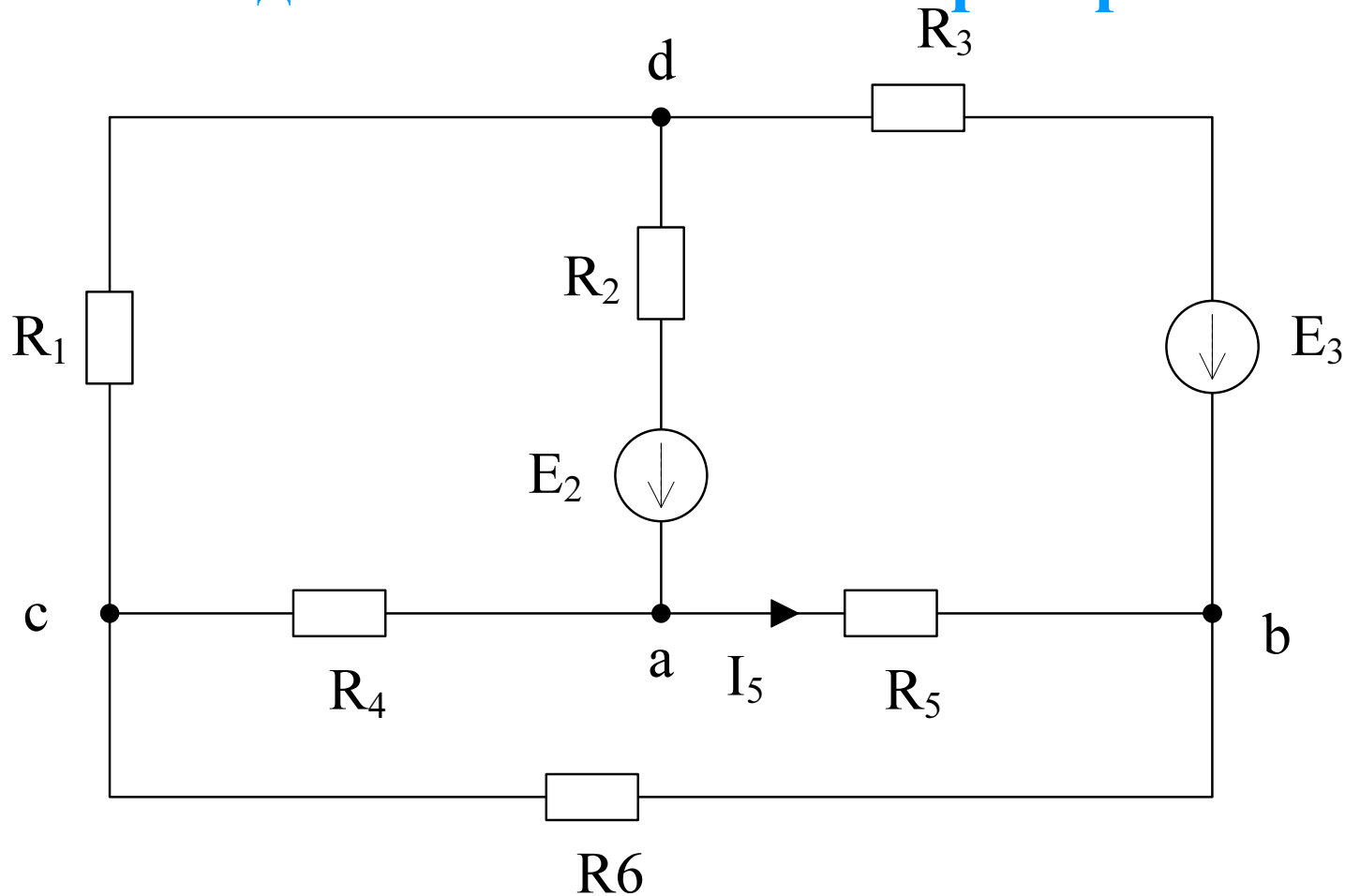
Увімкнемо у вихідне електричне коло (рис. 9а) послідовно з резистором опором R два зустрічно спрямованих джерела ЕРС $E = U_{abxx}$ (рис.10б).



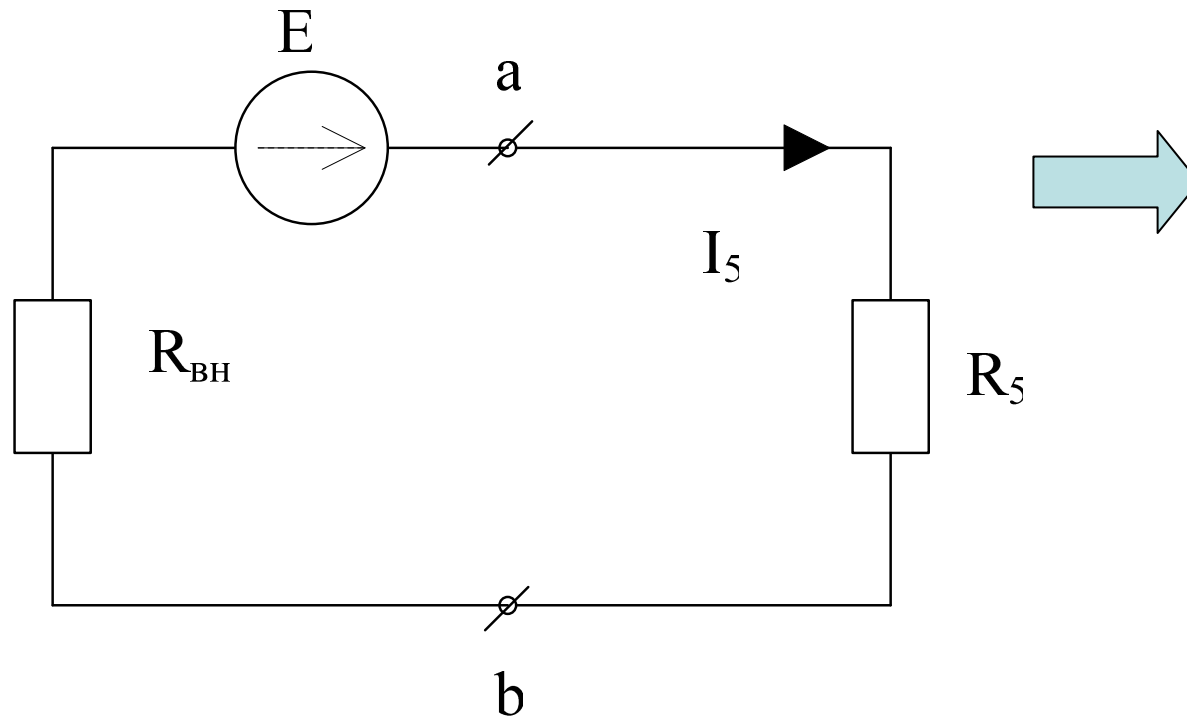
Розглянемо роботу електричного кола, наведеного на рис.10б методом накладання:



1.10 Метод еквівалентного генератора



Метод еквівалентного генератора призначений для визначення струму в одній вітці складного кола з резистором R . При цьому інша частина кола замінюється еквівалентним їй елементарним джерелом напруги.



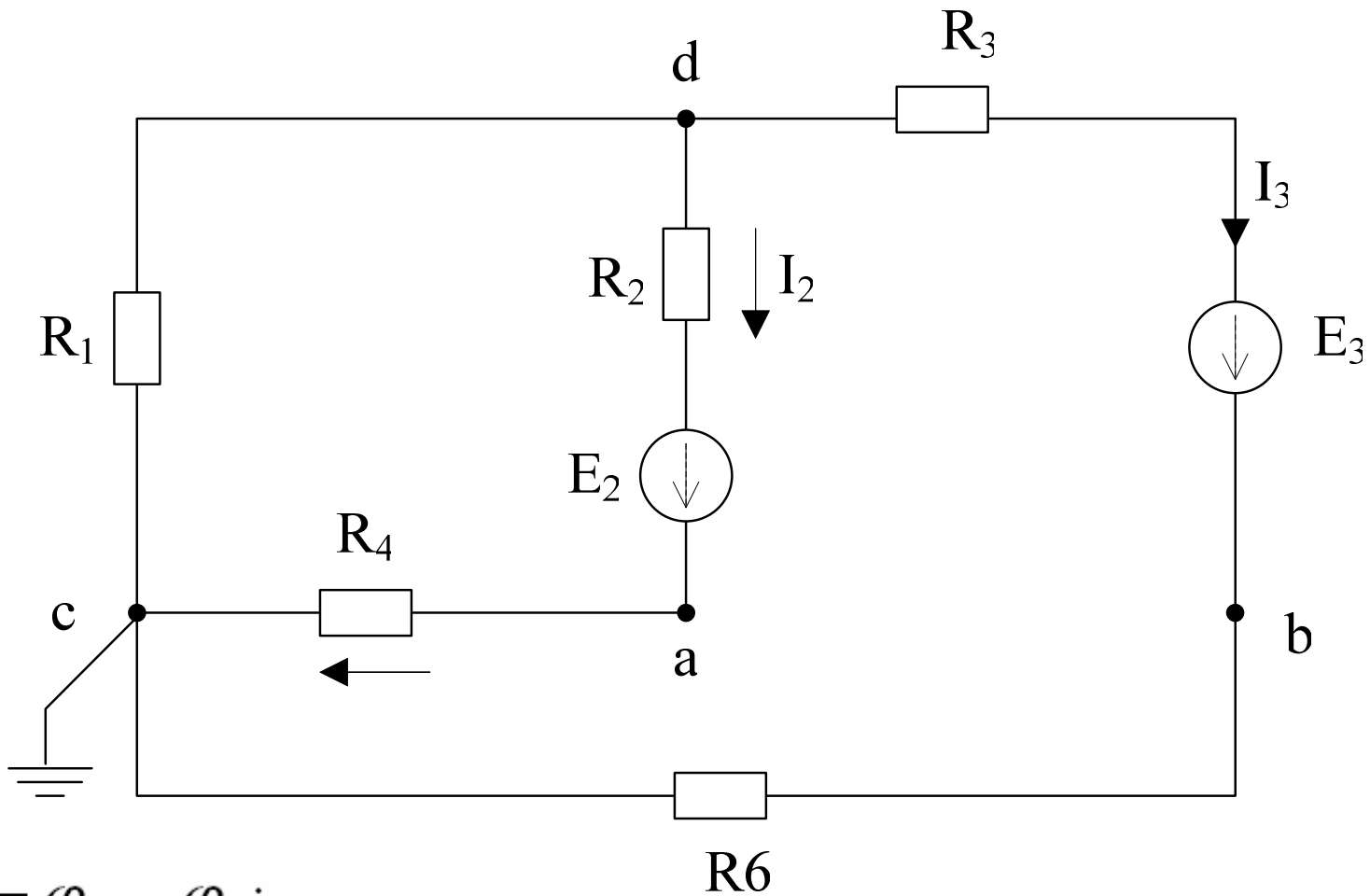
$$I = \frac{U_{xx}}{R_{BH} + R}$$

$$I_5 = \frac{U_{abxx}}{R_{вхab} + R_5}$$

$$E = U_{abxx}$$

$$R_{BH} = R_{вхab}$$

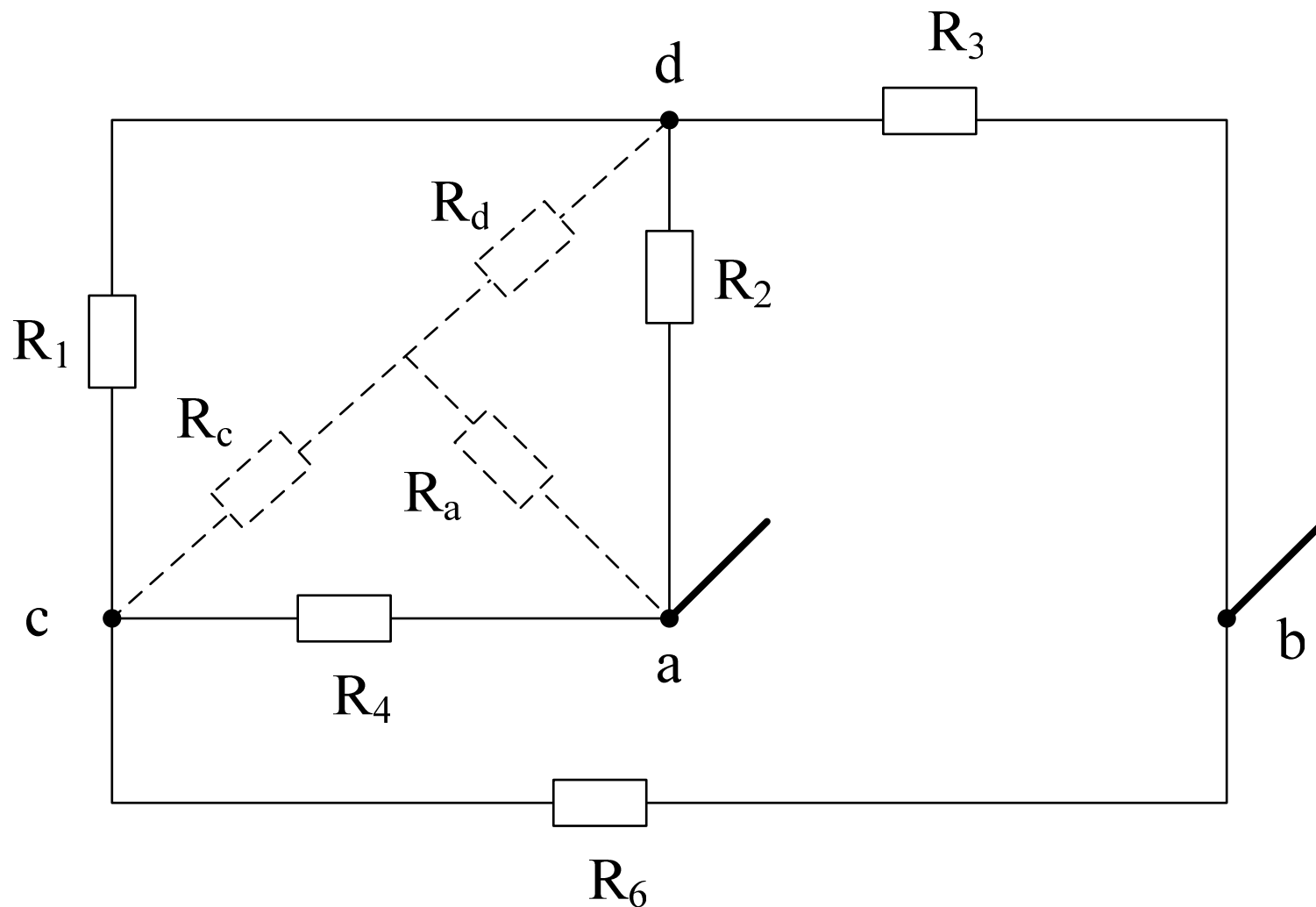
ЕРС еквівалентного джерела напруги визначається для кола при відключеній вітці з резистором R . Ця ЕРС дорівнює різниці потенціалів точок (напрузі U_{xx} холостого ходу), до яких була підключена вітка із резистором R . Внутрішній опір джерела напруги R_{BH} дорівнює вхідному опору кола щодо точок підключення резистора R при відсутності джерел ЕРС та струму.



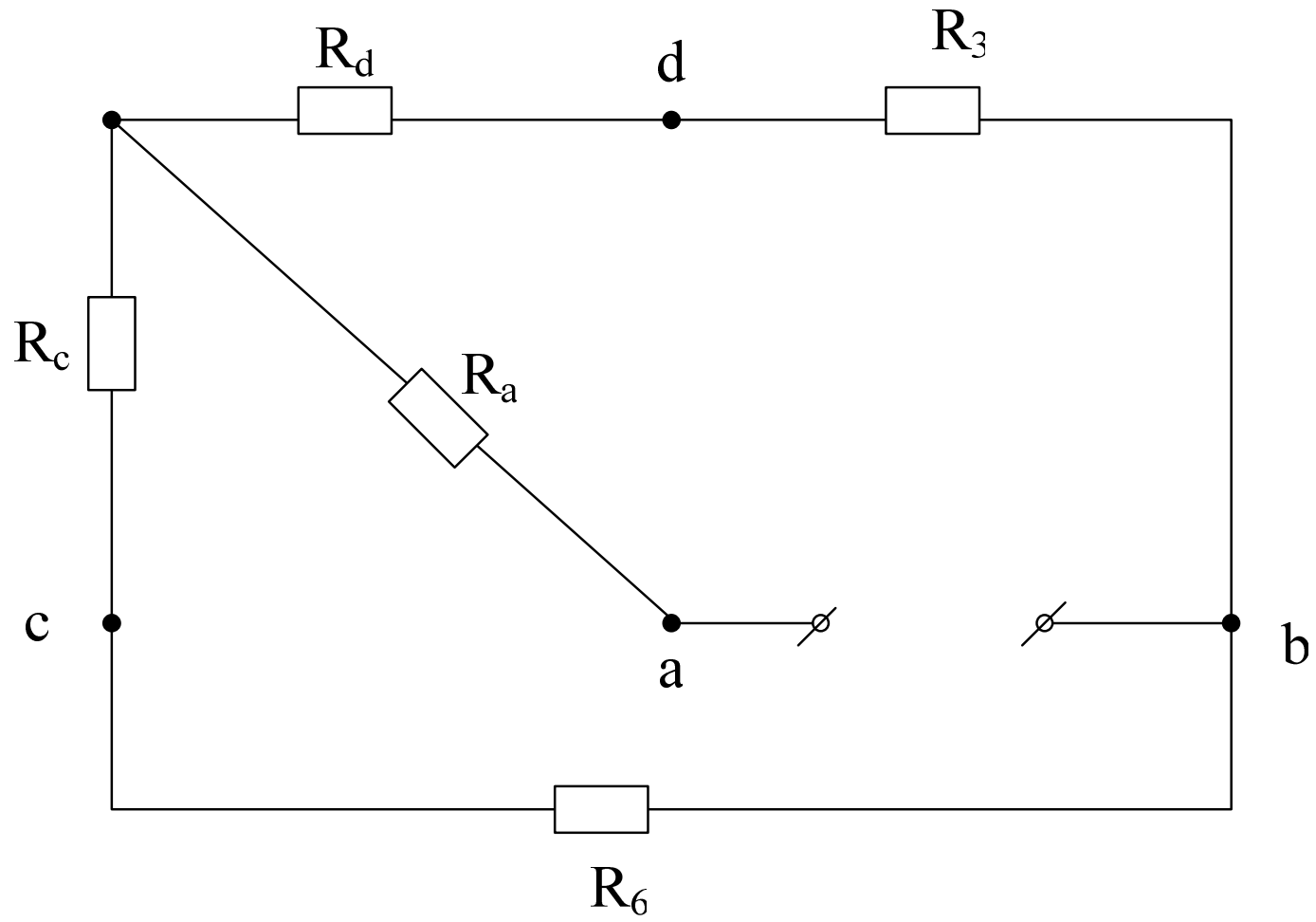
$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b;$$

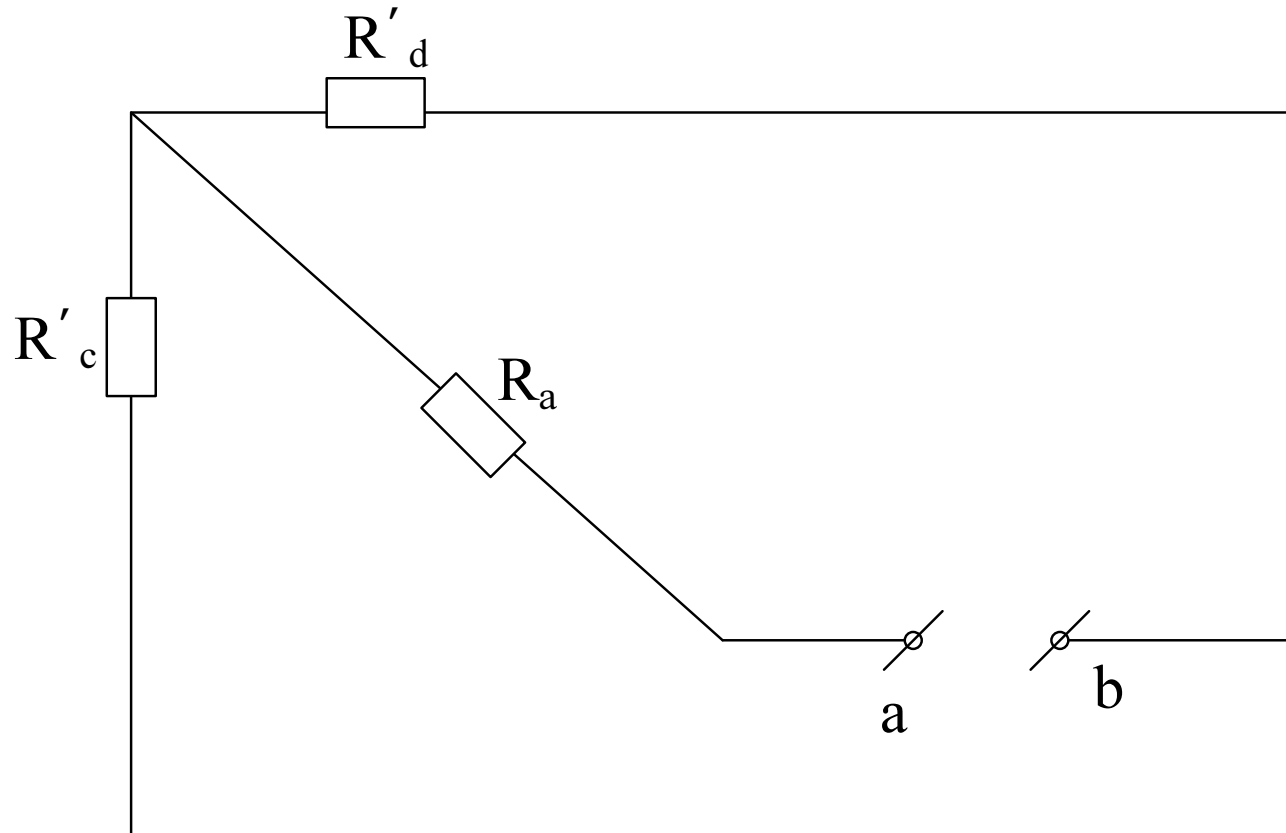
$$U_{dc} = \frac{-E_2 G_2 - E_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}; \quad I_2 = \frac{U_{dc} + E_2}{R_2 + R_4}; \quad I_3 = \frac{U_{dc} + E_3}{R_3 + R_6};$$

$$G_1 = \frac{1}{R_1}; \quad G_2 = \frac{1}{R_2 + R_4}; \quad G_3 = \frac{1}{R_3 + R_6}; \quad \varphi_a = I_2 R_4; \quad \varphi_b = I_3 R_6$$



$$R_d = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_4}; \quad R_a = \frac{R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_4}; \quad R_c = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_2 + R_4};$$





$$R'_c = R_c + R_6; \quad R'_d = R_d + R_3;$$

$$R_{\text{ex}} = R_a + \frac{R'_c R'_d}{R'_c + R'_d}.$$

1.11 Баланс мощностей

Для проверки проведенного расчета стромів складається рівняння енергетичного балансу (баланс мощностей) у колі, тобто переконуються, чи дорівнює потужність джерел живлення сумарній потужності споживачів електричної енергії в колі.

$$\sum P_{дж} = \sum P_{спож}$$

1. Сумарна потужність джерел

$$\sum P_{дж} = \sum E_i I_i$$

2. Сумарна потужність споживачів

$$\sum P_{спож} = \sum R_i I_i^2$$

3. Якщо $\sum P_{дж} = \sum P_{спож}$, то в колі виконується закон збереження енергії і можна вважати, що завдання вирішене вірно. Для інженерних розрахунків досить, щоб розбіжність між цими потужностями не перевищувала 5%.

1.12 Потенційна діаграма

Побудова потенційної діаграми:

1. Вибирають контур, для побудови потенційної діаграми.
2. Приймають потенціал будь-якого вузла контуру за 0.
3. По **осі X** діаграми відкладають сумарний опір від початку діаграми до поточного вузла, а по **осі Y** – потенціал цього вузла. Після обходу контуру потенціал останнього вузла повинен дорівнювати 0.

