

### 3. Методи розрахунку розгалужених електричних кіл

#### 3.1. Поняття про розрахунок електричного кола

Якщо на коло діє зовнішній вплив, наприклад, підключається джерело напруги, то на її елементах з'являється відгук (реакція) на цей вплив у вигляді струмів і падінь напруги на елементах.

У загальному випадку розрахунок електричного кола при відомій схемі і параметрах її елементів передбачає визначення струмів і напруг, які діють на всіх ділянках кола. Якщо умовою завдання визначено характер реакції і ділянку кола, де вона реєструється, то розрахунок підлягає саме ця величина.

Для розрахунку струмів і напруг складають рівняння (системи рівнянь - для розгалужених електричних кіл), що зв'язують струми і напруги в елементах і ділянках кола. Число рівнянь у системі визначається числом невідомих струмів (напруг).

Рівняння, що описують процеси в колі, складаються у відповідності з основними законами електротехніки - законом Ома і законами Кірхгофа - першим і другим.

Розрахунок розгалуженого електричного кола може бути виконаний різними методами, зокрема:

- методом рівнянь Кірхгофа;
- методом контурних струмів;
- методом вузлових напруг;
- методом накладення;
- методом еквівалентного генератора.

Вибір раціонального методу або поєднань методів залежить від характеру завдання і особливостей досліджуваного кола.

На завершальному етапі розрахунку здійснюють перевірку результатів, використовуючи певні прийоми, зокрема, перевірку балансу струмів в вузлах, балансу напруг в контурах, балансу потужностей.

#### 3.2. Еквівалентні перетворення схем електричних кіл

Як правило, на попередньому етапі розрахунку розгалужену, багатоконтурну схему спрощують шляхом поступової заміни окремих її ділянок простішими аж до перетворення вихідної схеми в одноконтурну. Розрахунок струму в перетвореній схемі здійснюють використовуючи безпосередньо закон Ома. На наступному етапі здійснюють поступове зворотне перетворення схеми, аж до початкового варіанту, обчислюючи на кожному черговому кроці струм (напругу) на відповідних ділянках.

Найбільш характерними видами еквівалентних перетворень є:

- заміна послідовно і паралельно з'єднаних пасивних елементів еквівалентними;
- перетворення з'єднань виду "зірка" в з'єднання виду "трикутник" і навпаки;
- перетворення джерел напруги в джерела струму і навпаки.

Еквівалентні перетворення використовують, як правило, на початковому етапі розрахунків, як допоміжний прийом.

В окремих випадках при розрахунках розгалужених кіл користуються тільки еквівалентними перетвореннями.

#### 3.3. Розрахунок електричних кіл методом рівнянь Кірхгофа

В основі методу лежить складання і рішення системи незалежних рівнянь, записаних відповідно до першого та другого законів Кірхгофа. Число рівнянь в системі визначається числом невідомих, або шуканих, струмів.

За першим законом Кірхгофа складають вузлові рівняння для незалежних вузлів.

Незалежні вузли - вузли, які відрізняються один від іншого хоча б однією гілкою. Число незалежних вузлів в схемі на одиницю менше їх загального числа.

За другим законом Кірхгофа складають контурні рівняння для незалежних контурів.

Незалежні контури - контури, які відрізняються один від іншого хоча б однією гілкою. Будь-який з незалежних контурів не може бути складений тільки з гілок інших контурів.

Порядок розрахунку схеми електричного кола методом рівнянь Кірхгофа:

1. Проводять топологічний аналіз схеми - визначають гілки (їх число) з невідомими струмами, вибирають незалежні вузли і незалежні контури.
2. Вибирають (умовно) напрямки струмів в гілках, напруг на елементах і напрямки обходу контурів.
3. Будують комплексну схему заміщення. Наступні розрахунки виконують в рамках комплексного методу.
4. Складають вузлові рівняння для незалежних вузлів.
5. Складають контурні рівняння для незалежних контурів.
6. Вирішують систему рівнянь, тим самим розраховують комплексні зображення шуканих струмів, далі розраховують падіння напруги на елементах схеми.
7. Перевіряють правильність розрахунків, зокрема по балансу потужностей.
8. Від розрахованих комплексних зображень струмів і напруг переходять до оригіналів.

Проілюструємо основні етапи розрахунку схеми електричного кола методом рівнянь Кірхгофа наступним прикладом.

Скласти систему рівнянь для розрахунку струмів в гілках електричного кола, комплексна еквівалентна схема якого представлена на рис. 3.1.

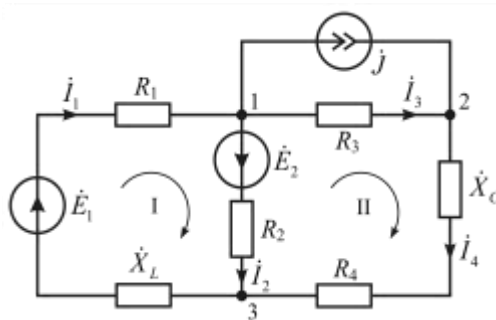


Рис. 3.1.

Рішення

1. Розрахунку підлягають струми  $i_1(t), i_2(t), i_3(t), i_4(t)$ , тобто, система повинна складатися з чотирьох рівнянь
2. Схема має три вузли: з них незалежних - два і три контури; виберемо в якості незалежних - 1-й і 2-й вузли, а також I-й і II-й контури.
3. Умовно обрані напрямки шуканих струмів в гілках позначимо стрілками.
4. Комплексна еквівалентна схема задана в умові задачі (рис. 3.1).
5. Для обраних незалежних вузлів складемо вузлові рівняння відповідно до першого закону Кірхгофа, а для обраних незалежних контурів - контурні рівняння відповідно до другого закону Кірхгофа:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 - \dot{J} = 0; \\ \dot{I}_3 - \dot{I}_4 + \dot{J} = 0; \\ \dot{I}_1(R_1 + \dot{X}_L) + \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ -\dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_3 R_3 + \dot{I}_4(R_4 + \dot{X}_C) = -\dot{E}_2. \end{cases}$$

6. Розв'язок отриманої системи рівнянь дає значення комплексних зображень шуканих струмів.

Наступні дії, тобто перехід до миттєвих значень струмів, а також визначення падінь напруги на елементах схеми здійснюють визначеним раніше порядком.

Метод рівнянь Кірхгофа є універсальним, тобто, може бути використаний для розрахунку схеми довільного кола. Його застосування обмежене в зв'язку з громіздкістю, пов'язаною з необхідністю вирішувати систему з великою кількістю рівнянь.

Є відомості, що Максвелл вперше помітив: не завжди є необхідність вирішувати систему, що складається з усієї сукупності вузлових і контурних рівнянь. Задачу розрахунку складного кола можна істотно спростити, звівши її до вирішення тільки контурних або тільки вузлових рівнянь.

Це спрощення досягається введенням нових шуканих змінних замість невідомих струмів в гілках. Такими шуканими змінними є „контурні струми“ і „вузлові напруги“.

Ці прийоми лежать в основі двох наступних методів розрахунку електричних кіл - методу контурних струмів і методу вузлових напруг.

### 3.4. Розрахунок електричних кіл методом контурних струмів

Метод контурних струмів (МКС) передбачає складання і розв'язок системи контурних рівнянь (відповідно до другого закону Кірхгофа) відносно, так званих, контурних струмів.

Розглянемо схему, показану на рис. 3.1.

Перетворимо джерело струму в еквівалентне джерело ЕРС. Це пов'язано з тим, що другий закон Кірхгофа передбачає врахування саме цієї моделі джерел енергії (рис. 3.2).

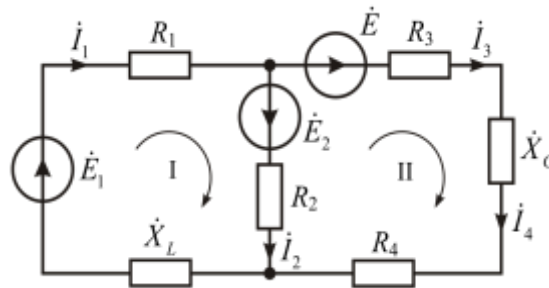


Рис. 3.2.

Складемо контурні рівняння для обраних незалежних контурів, враховуючи, що  $i_3 = i_4$

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_1 + \dot{X}_L) + \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ -\dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_4(R_3 + R_4 + \dot{X}_C) = \dot{E} - \dot{E}_2. \end{cases}$$

Позначимо контурні струми: першого контуру -  $\dot{I}_{11}$  ; другого контуру -  $\dot{I}_{22}$ . Як правило, при розрахунках напрямки контурних струмів і напрямки обходу контурів вибирають однаковими. Власними гілками позначених контурів є: першого контуру - гілка з елементами  $R_1, \dot{X}_L$  ; другого - гілка з елементами  $R_3, R_4, \dot{X}_C$ .

Відповідно до визначення контурних струмів струми в зазначених гілках можуть розглядатися як відповідні контурні струми, тобто,  $\dot{I}_1 = \dot{I}_{11}$ ;  $\dot{I}_4 = \dot{I}_{22}$ .

Через контурні можуть бути виражені і інші струми, в даному випадку струм  $\dot{I}_2$  :

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}.$$

Представимо в системі контурних рівнянь все струми в гілках через контурні, і після об'єднання в отриманих рівняннях відповідних доданків отримаємо

$$\begin{cases} \dot{I}_{11}(R_1 + R_2 + \dot{X}_L) - \dot{I}_{22} R_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ -\dot{I}_{11} R_2 + \dot{I}_{22}(R_2 + R_3 + \dot{X}_C + R_4) = -\dot{E}_2 + \dot{E}. \end{cases}$$

позначимо

$$\begin{aligned} Z_{11} &= R_1 + R_2 + \dot{X}_L; \\ Z_{22} &= R_2 + R_3 + \dot{X}_C + R_4; \\ Z_{12} &= Z_{21} = -R_2; \\ \dot{E}_{11} &= \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ \dot{E}_{22} &= -\dot{E}_2 + \dot{E}. \end{aligned}$$

Тут:  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  - власні опори контурів, першого і другого відповідно;

$Z_{12}$ ,  $Z_{21}$  - взаємний опір двох суміжних контурів, в даному випадку першого і другого (другого і першого);

$\dot{E}_{11}$ ,  $\dot{E}_{22}$  - контурні ЕРС.

Система контурних рівнянь з урахуванням введених позначень набуває вигляду

$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_{11} + Z_{12}\dot{I}_{22} = \dot{E}_{11}; \\ Z_{21}\dot{I}_{11} + Z_{22}\dot{I}_{22} = \dot{E}_{22}. \end{cases}$$

Ця ж система рівнянь в матричній формі має вигляд

$$\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{E}_{11} \\ \dot{E}_{22} \end{vmatrix},$$

де  $\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}$  - матриця контурних опорів (МКО);

$\begin{vmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{22} \end{vmatrix}$  - матриця контурних струмів (МКС);

$\begin{vmatrix} \dot{E}_{11} \\ \dot{E}_{22} \end{vmatrix}$  - матриця контурних ЕРС (МКЕ).

Система рівнянь може бути вирішена будь-яким з відомих методів, зокрема, за правилом Крамера:

$$\dot{I}_{kk} = \frac{\Delta_k}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^m \dot{E}_{ii} \Delta_{ik},$$

де  $\dot{I}_{kk}$  - шуканий контурний струм;

$\Delta$  - визначник матриці контурних опорів;

$\Delta_k$  - визначник матриці контурних опорів, в якій k-й стовпець замінений матрицею контурних ЕРС;

$\Delta_{ik}$  - алгебраїчне доповнення елемента, який розміщений на перетині i-го рядка і k-го стовпця матриці  $\Delta_k$ ;

$\dot{E}_{ii}$  - контурна ЕРС i-го контуру.

Для розглянутого прикладу:

$$\dot{I}_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^2 \dot{E}_{ii} \Delta_{i1}; \quad \dot{I}_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^2 \dot{E}_{ii} \Delta_{i2}.$$

Від контурних струмів переходимо до струмів в гілках:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11}; \quad \dot{I}_4 = \dot{I}_{22}; \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}.$$

Якщо на початковому етапі розрахунків здійснено перетворення джерел струму в еквівалентні джерела ЕРС, то струм в гілці, паралельній джерелу струму в вихідній схемі, визначають з вузлового рівняння, складеного за першим законом Кірхгофа, для перетвореної ділянки. Так, в розглянутому прикладі для визначення струму  $\dot{I}_3$  складають рівняння для другого вузла  $\dot{I}_3 + \dot{J} - \dot{I}_4 = 0$  і вирішують його відносно  $\dot{I}_3$ , а саме,  $\dot{I}_3 = \dot{I}_4 - \dot{J}$ .

З огляду на викладене, сформулюємо алгоритм розрахунку електричного кола методом контурних струмів:

1. Скласти комплексну еквівалентну схему заданого електричного кола, перетворюючи джерела струму в еквівалентні джерела ЕРС.
2. Вибрати незалежні контури, обрати і позначити напрямки контурних струмів.
3. Розрахувати власні і взаємні опори контурів, а також контурні ЕРС.
4. Скласти систему контурних рівнянь відносно контурних струмів і вирішити її.
5. Через контурні струми визначити струми в гілках схеми.
6. Перевірити правильність розрахунків за балансом потужностей.
7. Від комплексних зображень знайдених величин перейти до оригіналів (миттєвих значень).

### 3.5. Розрахунок електричних кіл методом вузлових напруг

Метод вузлових напруг (МВН) передбачає рішення системи вузлових рівнянь, складених відповідно до першого закону Кірхгофа відносно вузлових напруг.

Вузлові напруги - це напруги незалежних вузлів відносно базисного, або опорного, вузла.

Таким чином, число рівнянь в системі дорівнює числу незалежних вузлів.

Додатній напрямок вузлової напруги на підготовленій до розрахунку схемі, як правило, позначають стрілкою в напрямку від розглянутого вузла до базисного. За розрахованими вузловими напругами визначають шукані струми в гілках електричного кола.

Для з'ясування особливостей методу звернемося до розглянутої раніше схеми (рис. 3.1) і перетворимо джерела ЕРС в еквівалентні джерела струму (перший закон Кірхгофа враховує джерела енергії, представлені цією моделлю):

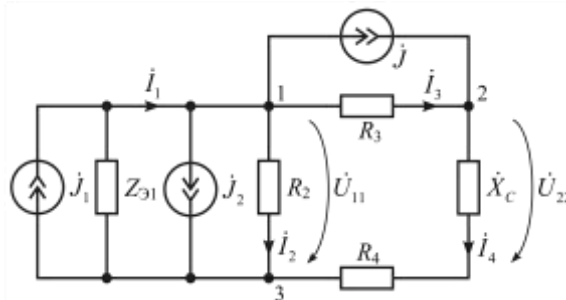


Рис. 3.2.

$$\dot{J}_1 = \frac{\dot{E}_1}{Z_{31}} = \frac{\dot{E}_1}{R_1 + \dot{X}_L}; \quad \dot{J}_2 = \frac{\dot{E}_1}{R_2}$$

З трьох вузлів схеми перший і другий виберемо як незалежні, а третій вузол - в якості базисного. Складемо систему вузлових рівнянь для незалежних вузлів:

$$\begin{cases} -\dot{U}_{11} Y_{31} - \dot{U}_{11} Y_2 - (\dot{U}_{11} - \dot{U}_{22}) Y_3 + \dot{J}_1 - \dot{J}_2 - \dot{J} = 0; \\ (\dot{U}_{11} - \dot{U}_{22}) Y_3 - \dot{U}_{22} Y_{32} + \dot{J} = 0. \end{cases}$$

Тут враховано, що

$$Y_{\text{31}} = \frac{1}{R_1 + \dot{X}_L}; \quad Y_2 = \frac{1}{R_2}; \quad Y_3 = \frac{1}{R_3}; \quad Y_{\text{32}} = \frac{1}{R_4 + \dot{X}_C}.$$

Розкриваючи дужки і об'єднуючи відповідні складові, отримуємо систему рівнянь в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \dot{U}_{11}(Y_{\text{31}} + Y_2 + Y_3) - \dot{U}_{22}Y_3 = \dot{J}_1 - \dot{J}_2 - \dot{J}; \\ -\dot{U}_{11}Y_3 + \dot{U}_{22}(Y_3 + Y_{\text{32}}) = \dot{J}. \end{cases}$$

Введемо позначення:

$Y_{11} = Y_{\text{31}} + Y_2 + Y_3$  - власна провідність першого вузла;

$Y_{22} = Y_{\text{32}} + Y_3$  - власна провідність другого вузла;

$Y_{12} = Y_{21} = -Y_3$  - взаємна провідність першого і другого (другого і першого) вузлів;

$\dot{J}_{11} = \dot{J}_1 - \dot{J}_2 - \dot{J}$  - вузловий струм першого вузла;

$\dot{J}_{22} = \dot{J}$  - вузловий струм другого вузла.

Власна провідність незалежного вузла дорівнює сумі провідностей гілок, які сходяться в даному вузлі.

Взаємна провідність двох незалежних вузлів дорівнює сумі провідностей гілок, які з'єднують ці вузли. Якщо напрямок вузлових напруг щодо базисного вузла вибрано однаковим (як правило, так і діють на практиці), взаємна провідність в вузлових рівняннях враховується зі знаком «-».

Вузловий струм незалежного вузла дорівнює алгебраїчній сумі струмів всіх джерел струму, які з'єднані з цим вузлом. Струми джерел, спрямовані «до вузла», враховуються зі знаком «+», струми джерел, спрямовані «від вузла», враховуються зі знаком «-».

З урахуванням введених позначень система вузлових рівнянь набуває канонічного вигляду:

$$\begin{cases} Y_{11}\dot{U}_{11} + Y_{12}\dot{U}_{22} = \dot{J}_{11}; \\ Y_{21}\dot{U}_{11} + Y_{22}\dot{U}_{22} = \dot{J}_{22}. \end{cases}$$

Ця ж система в матричній формі

$$\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{J}_{11} \\ \dot{J}_{22} \end{vmatrix},$$

де  $\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix}$  - матриця вузлових провідностей (МВП);

$\begin{vmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{22} \end{vmatrix}$  - матриця вузлових напруг (МВН);

$\begin{vmatrix} \dot{J}_{11} \\ \dot{J}_{22} \end{vmatrix}$  - матриця вузлових струмів (МВС).

Розв'язують систему рівнянь будь-яким з відомих способів або прийомів, зокрема, за формулою Крамера:

$$\dot{U}_{kk} = \frac{\Delta_k}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^m \dot{J}_i \Delta_{ik},$$

де  $\dot{U}_{kk}$  - шукана вузлова напруга;

$\Delta$  - визначник матриці вузлових провідностей;

$\Delta_k$  - визначник матриці вузлових провідностей, в якій  $k$ -й стовбець замінений матрицею вузлових струмів;

$\Delta_{ik}$  - алгебраїчне доповнення елемента, який розміщений на перетині  $i$ -го рядка і  $k$ -го стовбця матриці  $\Delta_k$ ;

$\dot{J}_{ii}$  - вузловий струм  $i$ -го вузла.

Для розрахунку струмів в гілках повертаються до вихідної схеми. Струми в гілках, в яких здійснювалися перетворення джерел ЕРС в еквівалентні джерела струму, визначають з урахуванням вузлових напруг, а також ЕРС джерел. При цьому складають рівняння за другим законом Кірхгофа для перетворених ділянок.

У загальному випадку розрахункова формула має вид

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_{kk} \pm \dot{E}_k}{Z_k}.$$

Визначимо струми в гілках розглянутої схеми:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{11} + (Z_1 + \dot{X}_L)\dot{I}_1 &= \dot{E}_1 \Rightarrow \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{11}}{Z_1 + \dot{X}_L}; \\ \dot{U}_{11} - Z_2\dot{I}_2 &= -\dot{E}_2 \Rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 + \dot{U}_{11}}{Z_2}. \end{aligned}$$

Струми в гілках, які не піддавалися еквівалентним перетворенням, розраховують через знайдені вузлові напруги і опір гілок, а саме:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{22}}{Z_3}; \quad \dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{22}}{\dot{X}_C + R_4}.$$

Узагальнюючи отримані результати, визначимо послідовність дій при реалізації розглянутого методу.

1. Складають комплексну схему заміщення, при цьому джерела ЕРС замінюють еквівалентними джерелами струму.
2. Вибирають незалежні вузли, вибирають і позначають напрямки вузлових напруг.
3. Розраховують власні і взаємні вузлові провідності, а також вузлові струми.
4. Складають і вирішують систему вузлових рівнянь.
5. Повертаються до вихідної схеми і розраховують струми в гілках.
6. Перевіряють правильність розрахунків за балансом потужностей.
7. Від комплексних зображень розрахованих струмів переходять до оригіналів.

### 3.6. Розрахунок електричних кіл методом накладання

В основі методу накладання лежить принцип накладення, або принцип суперпозиції, сутність якого полягає в тому, що реакція лінійної фізичної системи на суму однотипних зовнішніх впливів дорівнює сумі реакцій на кожний вплив окремо.

Стосовно лінійного електричного кола принцип накладення зводиться до наступного: реакція лінійного електричного кола на суму однотипних зовнішніх впливів дорівнює сумі реакцій на кожний вплив окремо.

Одним із прикладів використання принципу суперпозиції є розрахунок електричних кіл, у складі яких діють декілька однотипних джерел живлення.

Порядок розрахунку електричних кіл методом накладення:

1. Вихідна схема електричного кола представляється сукупністю часткових схем, в кожній з яких діє одне джерело живлення. Інші джерела зі схеми виключаються, а саме: затискачі джерел ЕРС з'єднуються накоротко, джерела струму замінюють розривом; при цьому в схемі залишають внутрішні опори джерел.

2. Відповідно до загальноприйнятих правил розраховуються струми (напруги) в кожній з часткових схем.

3. Шукані струми (напруги) у вихідній схемі обчислюють як алгебраїчну суму часткових струмів (напруг).

### 3.7. Розрахунок електричних кіл методом еквівалентного генератора

Відомо, що одним з можливих варіантів побудови схем є представлення досліджуваного електричного кола або його ділянок у вигляді двохполюсника, тобто кола з двома зовнішніми затискачами, або полюсами. Двохполюсники можуть бути пасивними і активними. Пасивні двохполюсники не містять незалежних джерел енергії, на їх зовнішніх затискачах відсутня напруга.

Активні двохполюсники містять хоча б одне джерело енергії, а на їх зовнішніх затискачах діє певна різниця потенціалів.

Активні двохполюсники характеризуються такими параметрами:

– напруга холостого ходу  $\dot{U}_{xx}$  – напруга, яке діє на розімкнених затискачах двохполюсника;

– струм короткого замикання  $\dot{I}_{кз}$  – струм в гілці, яка закорочує зовнішні затискачі двохполюсника;

– внутрішній опір  $Z_{вн}$  – опір двохполюсника відносно зовнішніх затискачів; при розрахунках внутрішнього опору двохполюсника джерела живлення зі схеми виключають - джерела ЕРС закорочують, а джерела струму розмикають.

Метод еквівалентного генератора заснований на теоремі про еквівалентний генератор (теоремі Гельмгольца-Тевенена), відповідно до якої: будь-який активний двохполюсник може бути представлений еквівалентним генератором з електрорушійною силою, яка дорівнює напрузі холостого ходу, і внутрішнім опором, рівним внутрішньому опору двохполюсника. Прийmemo теорему без доведення.

Метод еквівалентного генератора використовують у випадках, коли в складному розгалуженому колі необхідно визначити струм в одній гілці з опором  $Z_n$ , який представляє собою навантаження кола. При реалізації методу зовнішню, по відношенню до гілки з шуканим струмом, частину кола представляють у вигляді активного двохполюсника.

Порядок розрахунку електричного кола методом еквівалентного генератора:

1. Визначають ЕРС еквівалентного генератора. Для цього вилучають зі схеми гілку з опором  $Z_n$ , струм в якій необхідно визначити, і будь-яким раціональним способом розраховують напругу холостого ходу, тобто напругу на розімкнених затискачах кола, яке утворилося.

2. Визначають внутрішній опір еквівалентного генератора. Для цього закорочують затискачі джерел ЕРС, розмикають гілки з джерелами струму (внутрішні опори джерел залишають) і будь-яким зручним способом визначають еквівалентний опір відносно розімкнених затискачів кола.

3. Розраховують шуканий струм за формулою

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_{xx}}{Z_{вн} + Z_n}.$$