

ТЕМА 2.3.
РОЗРАХУНОК ЗАМКНУТИХ МЕРЕЖ

7.1. Загальні відомості

Замкнутими називають мережі, споживачі яких можуть жититися не менш як з двох напрямків. Надійність електропостачання замкнутих мереж значно вища, ніж розімкнутих. У розімкнутій мережі (рис. 7.1а) у разі пошкоджень на головних ділянках припиняється електропостачання всіх споживачів цієї лінії. Це явище особливо небажане під час постачання сільськогосподарських споживачів, де підвищені вимоги до безперервності подачі електроенергії.

Якщо в схемі (рис. 7.1а) з'єднати пункти 5 і 8, 12 і 16, то мережа перетвориться в замкнуту (рис. 7.1б). Тепер з вимикання ділянки $A-1$ подача електроенергії до споживачів 1–5 не припиниться, живлення їх здійснюватиметься через ділянку лінії A

$-6-7-8$. І, навпаки, у разі вимикання ділянки $A-6$ споживачі 6–8 жититимуться від ділянки $A-1-2-8-4-5$. Отже, кожний споживач електричної енергії може жититися з двох напрямків. Проте у разі виходу з ладу ділянок $A-1$ і $A-6$ значно збільшиться відстань віддалених споживачів від підстанції A . Це вимагає не лише створення додаткових ділянок 5–8, 12–16, а й значного збільшення перерізу проводів інших ділянок, щоб забезпечити допустимі відхилення напруги у віддалених споживачів. Тому витрати матеріалу провідників у замкнутих мережах завжди більші, ніж у розімкнутих.

Надійність схеми можна підвищити, якщо додатково провести внутрішні лінії, наприклад $A-5, 9-15$ (рис. 7.1в).

У цьому випадку точки 5, 9, 15 зможуть жититися з трьох боків. Точки електромережі, які можуть жититися не менш як з трьох напрямків, називаються *вузловими*, або *вузлами*. Замкнуті мережі, які не мають вузлів (наприклад, схема рис. 7.1б), називаються *простими замкнутими мережами*, а мережі, які мають вузлові точки, – *складними замкнутими мережами* (рис. 7.1в).

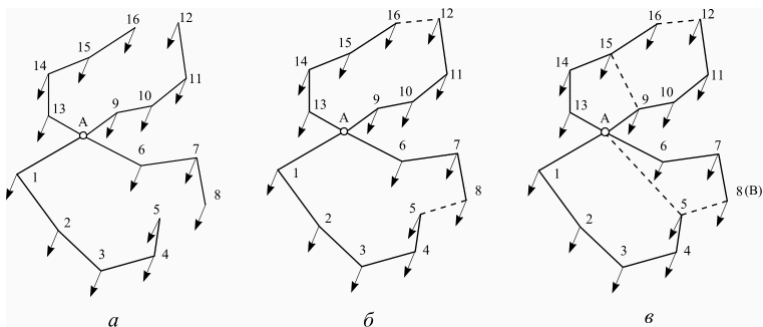


Рис. 7.1. Розподільні мережі:
a – розімкнута; *б*, *в* – замкнуті

В електричній мережі може бути кілька джерел, наприклад *A* і *B* (рис. 7.1в).

У схемі з вузлами порівняно з простою замкнутою мережею передбачені додатково дві лінії *A – 5* і *9 – 15*. Загальна довжина ліній збільшується, проте умови електропостачання у разі аварійного вимикання ділянок *A – 1*, *A – 6*, *A – 9*, *A – 13* полегшуються, тому можна зменшити переріз проводів магістральних ділянок.

Схему замкнутої мережі вибирають, порівнюючи техніко-економічні показники її різних варіантів.

Основні переваги замкнутих мереж:

1. Безперерійність живлення споживачів електричної енергії, рівень якої визначається видом релейного захисту, що використовується в мережі.

2. Оперативна і режимна гнучкість схеми. У замкнутих мережах без порушення електропостачання можна змінювати напрямки передачі електроенергії, що важливо, наприклад, під час ремонтних робіт. Без вимикання споживачів можемо вимикати окремі ділянки мережі для огляду і ремонту. Крім того, у замкнутих мережах поліпшується режим напруги.

3. Втрати потужності й енергії в замкнутих мережах

менші, ніж у розімкнутих. У деяких випадках вартість спорудження резерву для замкнутих мереж також менша від вартості резерву розімкнутих мереж.

З урахуванням зазначених переваг замкнуті мережі рекомендуються для живлення споживачів першої і другої груп.

Недоліки замкнутих мереж порівняно з розімкнутими:

а) більші витрати матеріалів;

б) більші капіталовкладення;

в) складніші схеми релейного захисту і автоматики.

Розрахунок замкнутих мереж складніший, ніж розімкнутих. У розімкнутих мережах потужності або струми на окремих ділянках визначають простим підсумовуванням відповідних навантажень. У замкнутих мережах, навіть якщо довжини ділянок і переріз проводів відомі, визначення потужностей або струмів на цих ділянках потребує спеціальних розрахунків. Розподіл потужності або струму в мережі залежить від довжини, перерізу проводів усіх ділянок мережі, навантаження і його розподілу в усій мережі, а також від напруги джерел живлення.

7.2. Розрахунок лінії з двостороннім живленням

Лінія з двостороннім живленням являє собою більш простий тип замкнутої мережі. Це – магістраль з двома джерелами живлення (рис. 7.2). У разі обриву проводів на будь-якій ділянці і навіть виходу з ладу одного джерела живлення електропостачання споживачів не порушується.

Допустимо, що в розглядуваній лінії (рис. 7.2) точка 1 живиться від джерела *A*, а точка 3 – від джерела *B*. Точку 2, яка живиться від обох джерел, називають *точкою струмоподілу* і позначають на схемах трикутником. У загальному випад-

ку напруги джерел живлення відрізняються за значенням, тобто $U_A \neq U_B$. Позначимо навантаження i_1, i_2 та i_3 , а струми, що проходять ділянками, їх опори і довжини – відповідними індексами (наприклад, для ділянки $A1$ струм I_{A1} , опір z_{A1} і довжина l_{A1}). Допускаємо, що лінія виконана проводами з кольорового металу.

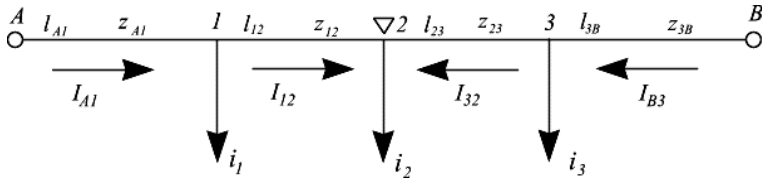


Рис. 7.2. Магістраль з двостороннім живленням

Спад напруги від джерел живлення до точки струмоподілу:

$$U_A^{\&} - U_2^{\&} = 3(I_{A1}^{\&} z_{A1} + I_{12}^{\&} z_{12}),$$

$$U_B^{\&} - U_2^{\&} =$$

(7.1)

$$3(I_{B3}^{\&} z_{B3} + I_{32}^{\&} z_{32}).$$

(7.2)

Відніmemo від першого рівняння друге:

$$U_A^{\&} - U_B^{\&} = 3(I_{A1}^{\&} z_{A1} + I_{12}^{\&} z_{12} - I_{B3}^{\&} z_{B3} - I_{32}^{\&} z_{32}).$$

(7.3)

Якщо нехтувати ємнісною провідністю лінії, то сума струмів, що витікають із джерел живлення, дорівнює сумі струмів навантажень:

$$I_{A1}^{\&} + I_{B3}^{\&} = i_1^{\&} + i_2^{\&} + i_3^{\&}. \quad (7.4)$$

Звідси:

$$I_{B3} = i_1 + i_2 + i_3 - I_{A1}$$

Користуючись першим правилом Кірхгофа, для точок 1 і 2 можемо записати:

$$I_{12}^{\&} = I_{A1}^{\&} - i_{1,}$$

$$I_{32}^{\&} = i_{2}^{\&} - I_{12}^{\&} = i_{1}^{\&} + i_{2}^{\&} - I_{A1}^{\&}$$

Підставивши ці значення в рівняння (7.3), після перетворення матимемо:

$$\frac{U_d^{\&}}{\sqrt{3}} + z_{12} \quad + z_{B3} \quad + z_{32} \quad) - i_{12}^{\&} (\quad + z_{B3} \quad + z_{32} \quad) - i_{22}^{\&} (\quad + z_{32} \quad + z_{B3} \quad) - U_g^{\&}$$

$$= I^{\&} ($$

z

) - $i\sqrt{3}z_{B3}$

Оскільки:
 $z_{A1} + z_{12} + z_{B3} + z_{32} = z_{AB}; z_{B3}$
 $+ z_{32} = z_{2B};$

$z_{12} + z_{B3} + z_{32} = z_{1B};$
 $z_{B3} = z_{3B}.$

діста
 ємо:

$$\frac{-i\sqrt{3}z_{B1} - i\sqrt{3}z_{B2} - i\sqrt{3}z_{B3}}{\sqrt{3}} = z_{AB}, \quad (7.5)$$

звідки:

$$I_{AB} = U_A - U_B + \sum_k i\sqrt{3}z_{kB}.$$

За аналогією для струму, що виходить із джерела B,
 можна записати:

$$I_{B3}$$

$$= U_B - U_A + \sum i_k z_{kA}. \quad (7.6)$$

z

$\sqrt{3z_{AB}}$

AB

Якщо $i_1 = i_2 = i_3$, то:

$$I_A = \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3z_{AB}}} = -I_B. \quad (7.7)$$

Струм, що витікає з джерел, за відсутності навантаження визначається відмінністю між напругами джерел і зсувом

фаз між ними. Він називається *зрівняльним струмом*. За $U_A = U_B$ з рівнянь (7.5) і (7.6) дістанемо другу складову струму, що виходить із джерела, – *лінійний навантажувальний струм*, який визначається лише навантаженням.

З рівнянь (7.5) і (7.6), $3U$, легко $\sqrt{\quad}$
 помноживши їх на
 визначити потужність
 джерел живлення.

Повна потужність
 джерела А:

$$S_{A3} = \frac{U_A^2 (U_A^2 - U_B^2)}{Z_{AB}} = \sum S_{k3} Z_{kA}$$

аналогічно:

$$S_{B3} = \frac{U_B^2 (U_B^2 - U_A^2)}{Z_{AB}} = \sum S_{k3} Z_{kB}$$

де U – номінальна напруга мережі;

s_k – повна потужність навантаження в якійсь точці k .

Отже, для розрахунку струморозподілу в лініях з двостороннім живленням спочатку визначають струм, що витікає з джерела, а потім – струми, що проходять по окремих ділянках лінії, і потужності. Точка, в якій струм або потужність змінюють свій знак, є точкою струморозподілу.

Розглянемо окремі випадки.

1. Напруги джерел живлення рівні між собою, тобто $U_A = U_B$. У цьому випадку струми (або потужності), що витікають із джерел живлення, визначаються лише навантаженнями:

$$I_{A1}$$

$$= \sum_k i \&_k z_{kB}, \quad (7.10)$$

z

AB

$$I\&_{B3} = \sum_k i \&_k z_{kB},$$

(7.11)

AB z

$$S_{A1} = \sum s_k z_{kB},$$

(7.12)

$$S_{B3} = \sum s_k z_{kA}.$$

(7.13)

AB Z

2. Напруги джерел живлення рівні між собою за абсолютним значенням ($U_A = U_B$) і збігаються за фазою; крім того, усі ділянки магістралі виконані однорідними проводами.

Оскільки:

$$z_{kB} = (r_0 + jx_0)l_{kB}; \quad z_{kA} = (r_0 + jx_0)l_{kA}; \quad z_{AB} = (r_0 + jx_0)l_{AB};$$

$$i_k = jip)k;$$

$$s_k = (p - jq)k,$$

=

(

ia

-

підставивши їх у рівнянні (7.10)–(7.13) і скоротивши на $r_0 + jx_0$, дістанемо:

$$I_{k\&}^{AB} = \sum_{k\&}^{AB} \frac{i_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} = \sum_{ak\&}^{AB} \frac{i_{ak\&} l_{ak\&}}{l_{AB}} - j \sum_{pk\&}^{AB} \frac{i_{pk\&} l_{pk\&}}{l_{AB}}, \quad (7.14)$$

$$I_{k\&}^{BA} = \sum_{k\&}^{BA} \frac{i_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} = \sum_{ak\&}^{BA} \frac{i_{ak\&} l_{ak\&}}{l_{AB}} - j \sum_{pk\&}^{BA} \frac{i_{pk\&} l_{pk\&}}{l_{AB}}, \quad (7.15)$$

$$S_{k\&}^{AB} = \sum_{k\&}^{AB} \frac{S_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} = \sum_{k\&}^{AB} \frac{p_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} - j \sum_{k\&}^{AB} \frac{q_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}}, \quad (7.16)$$

$$S_{k\&}^{BA} = \sum_{k\&}^{BA} \frac{S_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} = \sum_{k\&}^{BA} \frac{p_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}} - j \sum_{k\&}^{BA} \frac{q_{k\&} l_{k\&}}{l_{AB}}. \quad (7.17)$$

Цей випадок під час практичних розрахунків дуже поширений. Для спрощення розрахунку напруги джерел живлення беруть однаковими.

Магістраль лінії з двостороннім живленням майже завжди беруть однорідною, щоб втрати напруги в лінії у разі аварійного вимикання одного з джерел живлення були меншими. Для однорідної магістралі з двостороннім живленням розрахунки

спрощуються ще й тому, що до того ж можна окремо обчислювати активні і реактивні складові потужності або струму.

Лінії з двостороннім живленням, як і інші замкнуті мережі, забезпечують живлення споживачів як у нормальному, так і в аварійному режимі у разі виходу з ладу окремих ділянок. Тому під час розрахунків слід урахувувати відповідні допустимі втрати напруги. Перерізи проводів у лініях з двостороннім живленням визначають не за нормальним, а за аварійним режимом.

Лінії з двостороннім живленням розраховують у такій послідовності:

1) за допустимою втратою напруги в аварійному режимі визначають переріз проводів у разі живлення від одного, а потім від другого джерела живлення, до того ж магістраль вибирають однорідною, більший переріз беруть за розрахунковий і вибирають провід;

2) за рівняннями (7.14)–(7.17) знаходять активний і реактивний струми або потужності джерел живлення;

3) визначають окремо потокорозподіл для активних і реактивних струмів або потужностей; у загальному випадку точки струмоподілу активних і реактивних навантажень можуть не збігатися;

4) визначають найбільшу втрату напруги, в нормальному режимі.

Якщо втрати напруги виходять за межі допустимих, то збільшують переріз проводу і знову визначають максимальну втрату напруги.

Вибраний переріз проводів перевіряють за допустимим нагріванням.

7.3. Розрахунок складних замкнутих мереж

Розраховуючи складні замкнуті мережі, виходять з того, що найменші втрати бувають тоді, коли електроенергія до

споживачів надходить найкоротшим шляхом. Розрахунок проводять у такій послідовності:

1) складну замкнуту мережу ділять на кілька розімкнутих ділянок і, користуючись відомими рівняннями, за допустимою втратою напруги визначають розрахункові перерізи проводів або кабелів;

2) вибирають проводи стандартного перерізу, до того ж магістраль вибирають здебільшого однорідною;

3) послідовним перетворенням складну замкнуту мережу перетворюють у лінію з двостороннім живленням, знаходять потужності або струми, що витікають із джерел живлення, і визначають розподіл їх по магістралі та знаходять точку струмоподілу;

4) зворотним перетворенням від лінії з двостороннім живленням знову повертаються до вихідної замкнутої мережі; щоразу під час перетворень знаходять розподіл потужностей або струмів в ускладненій схемі; до того ж у вихідній схемі будуть дійсні розподіл навантаження і точки розподілу потужностей або струмів;

5) обчислюють найбільшу втрату напруги (до однієї з точок струмоподілу) в нормальному режимі; якщо втрата напруги перевищує допустиму, то змінюють переріз проводів і повторюють розрахунок;

6) аналогічно визначають найбільшу втрату напруги у разі розрахункових аварійних режимів і порівнюють її з допустимим значенням для цих режимів; якщо втрата напруги виходить за допустимі межі, то також змінюють переріз проводів і повторюють розрахунок.

Слід зазначити, що в складних замкнутих мережах за аварійних режимів перевантаження окремих ділянок менше, ніж у лінії з двостороннім живленням.

Вибрані перерізи проводів перевіряють за допустимим нагріванням.

Розглянемо докладніше деякі етапи методу перетворення.

1. Зведення проводів до одного перерізу. Щоб

розподіл навантажень і втрата напруги на всіх ділянках залишилися без змін, у разі заміни перерізу опір проводу має залишатися тим самим. Зводять проводи до одного перерізу за активним опором, вважаючи, що реактивний опір проводів з кольорового металу не залежить від їх перерізу.

Якщо ділянку довжиною l з перерізом проводів F зводять до перерізу F_{3B} , то слід додержуватись умови, що:

$$\frac{l}{F} = \frac{l_{3B}}{F_{3B}} = r, \quad (7.18)$$

$$l_{3B} = r F_{3B}$$

де l_{3B} – нова, зведена довжина ділянки. З рівняння (7.18) можна записати:

$$l = l_{3B} \frac{F_{3B}}{F}. \quad (7.19)$$

Для проводів з одного матеріалу, для яких $F_{3B} = F$, рівняння (7.19) спрощується:

$$l_{3B} = l \frac{F_{3B}}{F}.$$

(7.20)

F

2. Складання послідовних і паралельних віток і розподіл струму (потужності) віток. Загальний опір послідовних з'єднань ділянок (рис. 7.3а) становить:

$$z_{\Sigma} = z_1 + z_2 + \dots + z_n. \quad (7.21)$$

Струми (потужності) окремих віток рівні між собою:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n. \quad (7.22)$$

За паралельного з'єднання окремих ділянок (рис. 7.3б) їх сумарний опір визначають за формулою:

$$z_{\Sigma} = y_1 + y_2$$

$$+ \dots + y_n$$

(7.23)

де $y_1 = \frac{1}{z_1}, y_2 = \frac{1}{z_2}, \dots, y_n = \frac{1}{z_n}$ – провідність відповідних ділянок.

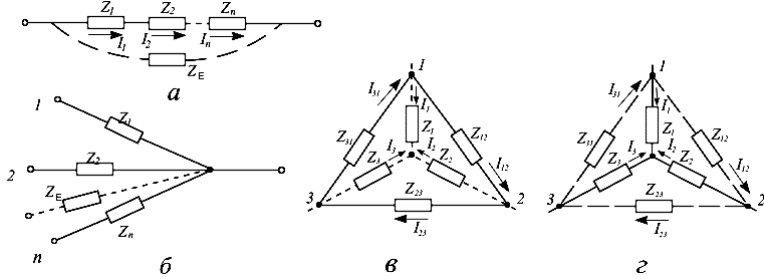


Рис. 7.3. Схеми перетворення електричних мереж:
 а – послідовне з'єднання віток; б – паралельне з'єднання віток; в – перетворення трикутника в зірку; г – перетворення зірки в трикутник

Для двох віток:

$$z_{\Sigma} = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2} \quad (7.24)$$

Паралельне з'єднання можна здійснювати лише за еквіпотенціальних (рівнопотенціальних) віток.

Якщо потенціали точок 1, 2, ..., n (рис. 7.3б) однакові, то спад напруги на окремих ділянках:

$$I_1 z_1 = I_2 z_2 = \dots = I_n z_n = I z, \quad (7.25)$$

звідки:

$$I = I_1 \frac{z_1}{z} ; I = I_2 \frac{z_2}{z} ; \dots ; I = I_n \frac{z_n}{z}$$

$$; \dots; I = I^z \quad (7.26)$$

n $\frac{z}{z}$

У разі однорідних проводів:

$$I = I_1^l; I_2^l; \dots; I_n^l = I^l. \quad (7.27)$$

Аналогічні рівняння можна записати для потужностей. Користуючись рівнянням (7.27), можна розподілити навантаження за окремими вітками.

3. Перенесення навантажень в інші точки. Якщо на паралельних вітках є відгалуження навантажень, то ці вітки не будуть рівнопотенціальними і складати їх не можна. Ці навантаження слід перенести в точки за межі паралельних віток, але так, щоб збереглися розподіл потужностей (струмів) і спад напруги в окремих ділянках.

Розглянемо перенесення навантажень на прикладі магістралі з двостороннім живленням (рис. 7.4а). Струм, що витікає з джерела А:

$$I_A = \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3z_{AB}}} + i_1(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + i_2(z_{23} + z_{3B}) + i_3 z_{3B}. \quad (7.28)$$

Перенесемо навантаження i_2 в точки 1 і 3 так, щоб розподіл навантаження не порушувався (рис. 7.4б). При цьому для струму, що витікає з джерела А, можна записати:

$$I_A = \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3z_{AB}}} + (i_1 + i_{21})(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + (i_3 + i_{23})z_{3B}. \quad (7.29)$$

де i_{21} і i_{23} – струми, перенесені з точки 2 відповідно в точки 1 і 3. Ліві частини рівнянь (7.28) і (7.29) рівні між собою, тому:

$$i_1(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + i_2(z_{23} + z_{3B}) + i_3 z_{3B} =$$

$$(i_{11} + i_{21})(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + (i_{13} + i_{23})z_{3B}.$$

Розкривши дужки, дістанемо:

$$i_{2Z23} + i_{2Z3B} = i_{1(Z12 + Z23 + Z3B)} + i_{2(Z23 + Z3B)} + i_{3Z3B}, \quad (7.30)$$

Оскільки:

$$i_{21} + i_{23} = i_{2'}$$

(7.31)

маємо:

$$i_{23} = i_{2'} - i_{21}.$$

(7.32)

Підставивши рівняння (7.32) у вираз (7.30), дістанемо:

$$i_{21} = i_{2'} - i_{23} = i_{2'} - (i_{2'} - i_{21}) = i_{21}.$$

Аналогічно:
о:

$$i_{23} = i_{2'} - i_{21} = i_{2'} - (i_{2'} - i_{23}) = i_{23}.$$

Аналогічні рівняння застосовують і для потужностей. Якщо вітки однорідні, то в рівняння (7.33) і (7.34) замість опорів підставляють довжини віток.

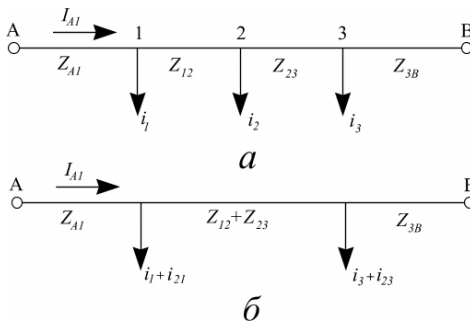


Рис. 7.4. Перенесення навантаження в інші точки

4. Перетворення трикутника в еквівалентну зірку і навпаки (рис. 7.3в,г). З теоретичної електротехніки відомо, що:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \quad (7.35)$$

$$Z_{23} = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} + Z_{23}$$

За заданого напрямку струмів у трикутнику струми в еквівалентній зірці:

$$I_1 = I_{12} - I_{31} \quad (7.36)$$

$$I_2 = I_{12} - I_{23}$$

Аналогічно визначають і потужності. У разі перетворення зірки в еквівалентний трикутник (рис. 7.3г) можна користуватися рівняннями:

$$\begin{aligned}
 z_{12} &= z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3} \quad \square \\
 z_{23} &= z_2 + z_3 + \frac{z_2 z_3}{z_1} \\
 z_{31} &= z_3 + z_1 + \frac{z_3 z_1}{z_2}
 \end{aligned}
 \tag{7.37}$$

Спад напруги між точками 1 і 2:

$$I_{12}^{\&} z_{12} = I_{11}^{\&} z_1 - I_{22}^{\&} z_2.$$

Звідки:

$$I_{12} = \frac{I_{21}z_1 - I_{12}z_2}{z_{12}} \quad (7.38)$$

Аналогічно:

$$I_{23} = \frac{I_{32}z_2 - I_{23}z_3}{z_{23}} \quad (7.39)$$

$$I_{31} = \frac{I_{13}z_3 - I_{31}z_1}{z_{31}}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які електричні мережі називаються замкнутими?
2. Які переваги мають замкнуті мережі порівняно з ро- зімкнутими?
3. Чим відрізняються складні замкнуті мережі від простих?
4. Які недоліки мають замкнуті мережі?
5. Як визначається розподіл струмів (потужностей) у лініях з двостороннім живленням?
6. Як розраховують складні замкнуті мережі?
7. Чому метод перетворення має найбільше поширення під час розрахунку замкнутих мереж?