ТЕМА 2.3.
РОЗРАХУНОК ЗАМКНУТИХ МЕРЕЖ

7.1. Загальні відомості

Замкнутими називають мережі, споживачі яких можуть живитися 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 безперебійності 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 *А – 1* подача електроенергії до споживачів *1–5* не припиниться, живлення їх здійснюватиметься через ділянку лінії *А – 6 – 7 – 8*. І, навпаки, у разі вимикання ділянки *А – 6* споживачі *6–8* живитимуться від ділянки *А – 1 – 2 – 8 – 4 – 5*. Отже, кожний споживач електричної енергії може живитися з двох напрямків. Проте у разі виходу з ладу ділянок *А – 1* і *А – 6* значно збільшиться відстань віддалених споживачів від підстанції *А*. 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 *А – 5, 9 – 15* (рис. 7.1в).

У цьому випадку точки *5, 9, 15* зможуть живитися з трьох боків. Точки електромережі, які можуть живитися 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).

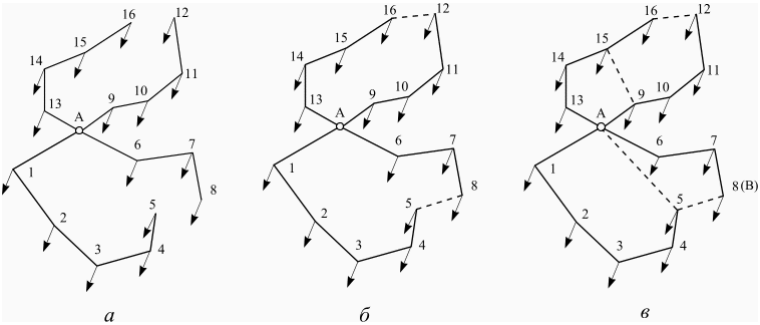

Рис. 7.1. Розподільні мережі:
а – розімкнута; *б*, *в* – замкнуті

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

2. Оперативна і режимна гнучкість схеми. У замкнутих ме- режах без порушення електропостачання можна змінювати на- прямки передачі електроенергії, що важливо, наприклад, під час ремонтних робіт. Без вимикання споживачів можемо вимикати окремі ділянки мережі для огляду і ремонту. Крім того, у замкну- тих 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.

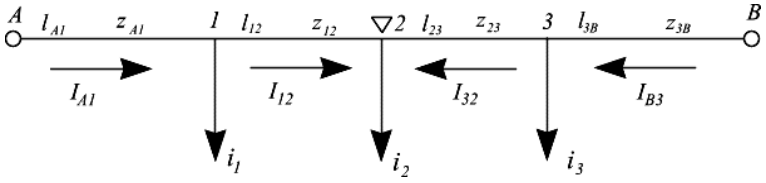

Рис. 7.2. Магістраль з двостороннім живленням

Спад напруги від джерел живлення до точки струмоподілу:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_2 = 3(\dot{I}_{A1} z_{A1} + \dot{I}_{12} z_{12}),$$

$$\dot{U}_B - \dot{U}_2 = 3(\dot{I}_{B3} z_{B3} + \dot{I}_{32} z_{32}) . \qquad (7.1)$$

(7.2)

Віднімемо від першого рівняння друге:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = 3(\dot{I}_{A1} z_{A1} + \dot{I}_{12} z_{12} - \dot{I}_{B3} z_{B3} - \dot{I}_{32} z_{32}) . \qquad (7.3)$$

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

$$\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B3} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3 . \qquad (7.4)$$

Звідси: $$\dot{I}_{B3} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3 - \dot{I}_{A1}$$

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

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_{A1} - \dot{i}_1,$$

$$\dot{I}_{32} = \dot{i}_2 - \dot{I}_{12} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 - \dot{I}_{A1}.$$

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

$$\frac{\dot{U}_A}{\sqrt{3}} + z_{12} \quad + z_{B3} \quad + z_{32} \quad) - \dot{i}_1(\quad + z_{B3} \quad + z_{32} \quad) - \dot{i}_2(\quad + z_{32}$$

$$\frac{-\dot{U}_B}{} \quad z_{12} \quad z_{B3}$$

$$= \dot{I}($$

$$z$$

$) - i\&_3 z_{B3}$.

Оскільки: $z_{12} + z_{B3} + z_{32} = z_{1B}$;

$z_{A1} + z_{12} + z_{B3} + z_{32} = z_{AB}$; z_{B3} $z_{B3} = z_{3B}$.

$+ z_{32} = z_{2B}$;

діста
ємо:

$$- i_1 z_{B1} \quad - i_2 z_{B2} \quad - i_3 z_{B3} \quad , \qquad (7.5)$$

$$\frac{}{\sqrt{3}} \quad A1 \quad AB$$

звідки: $I_{A1} = U_A - U_B + \sum i_k z_{kB}$.

z $\sqrt{3}z_{A}$

AB

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

I_{B3}

$$= \dot{U}_B - \dot{U}_A + \sum \dot{i}_k z_{kA}. \qquad (7.6)$$

$$z_{AB} \qquad \sqrt{3} z_{AB}$$

Якщо $\dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \dot{i}_3$, то:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3} z_{AB}} = -\dot{I}_3 \qquad (7.7)$$

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), помноживши їх на $\sqrt{3}U$, легко визначити потужність джерел живлення.

Повна потужність джерела *A:*

$$\underline{S}_{A3} = \frac{\underline{U}(\underline{U}_A - \underline{U}_B)}{z_{AB}} \quad \frac{\sum \underline{s}_k z_{kB}}{z_{AB}} \qquad (7.8)$$

аналогічно:

$$\underline{S}_{B3} = \frac{\underline{U}(\underline{U}_B - \underline{U}_A)}{z_{AB}} \quad \frac{\sum \underline{s}_k z_{kA}}{z_{AB}} \qquad (7.9)$$

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:

$$\underline{I}_{A1}$$

$$= \sum i\&_k z_{kB}, \qquad (7.10)$$

$$z_{AB}$$

$$I\&_{B3} = \sum i\&_k z_{kB}, \qquad (7.11)$$

$$z_{AB}$$

$$\dot{S}_{A1} = \sum \dot{s}_k z_{kB},$$

(7.12)

$$\dot{S}_{B3} = \sum \dot{s}_k z_{kA}.$$

(7.13)

2. Напруги джерел живлення рівні між собою за абсолютним значенням ($\dot{U}_A = \dot{U}_B$) і збігаються за фазою; крім того, усі ділянки магістралі виконані однорідними проводами.

Оскільки:

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

i_k $ji_P)k$; $s_k = (p -$ $jq)k$,

$=$

$($

i_a

$-$

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

$$\dot{I}_{A1} = \sum \frac{\dot{i}_k l_{kB}}{l_{AB}} = \sum \frac{\dot{i}_{ak} l_{kB}}{l_{AB}} - j \sum \frac{\dot{i}_{pk} l_{kB}}{l_{AB}}, \qquad (7.14)$$

$$\dot{I}_{B3} = \sum \frac{\dot{i}_k l_{kA}}{l_{AB}} = \sum \frac{\dot{i}_{ak} l_{kA}}{l_{AB}} - j \sum \frac{\dot{i}_{pk} l_{kA}}{l_{AB}}, \qquad (7.15)$$

$$\dot{S}_{A1} = \sum \frac{\dot{S}_k l_{kB}}{l_{AB}} = \sum \frac{p_{kB} l_{kB}}{l_{AB}} - j \sum \frac{q_{kB} l_{kB}}{l_{AB}}, \qquad (7.16)$$

$$\dot{S}_{B3} = \sum \frac{\dot{S}_k l_{kA}}{l_{AB}} = \sum \frac{p_{kA} l_{kA}}{l_{AB}} - j \sum \frac{q_{kA} l_{kA}}{l_{AB}}. \qquad (7.17)$$

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 мере- жі, забезпечують живлення споживачів як у нормальному, так і в аварійному режимі у разі виходу з ладу окремих ділянок. Тому під час розрахунків слід ураховувати відповідні допустимі втра- ти напруги. Перерізи проводів у лініях з двостороннім жив- ленням визначають не за нормальним, а за аварійним режимом.

Лінії з двостороннім живленням розраховують у такій послідовності:

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

2) за рівняннями (7.14)–(7.17) знаходять активний і реак- тивний 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 нормально- му 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 розімкну- тих ділянок і, користуючись відомими рівняннями, за допус- тимою 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 ме- режу перетворюють у лінію з двостороннім живленням, зна- ходять потужності або струми, що витікають із джерел жив- лення, і визначають розподіл їх по магістралі та знаходять точку струмоподілу;

4) зворотним перетворенням від лінії з двостороннім живленням знову повертаються до вихідної замкнутої мере- жі; щоразу під час перетворень знаходять розподіл потужно- стей 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 прово- дів і повторюють розрахунок;

6) аналогічно визначають найбільшу втрату напруги у разі розрахункових аварійних режимів і порівнюють її з до- пустимим значенням для цих режимів; якщо втрата напруги виходить за допустимі межі, то також змінюють переріз про- водів 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 $F_{зв}$, то слід додержуватись умови, що:

$$\frac{l}{\gamma F} = \frac{l_{зв}}{\gamma_{зв} F_{зв}} = r, \qquad (7.18)$$

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

$$l_{зв} = l\frac{\gamma_{зв} F_{зв}}{\gamma F}. \qquad (7.19)$$

Для проводів з одного матеріалу, для яких $\gamma_{зв} = \gamma$, рівняння (7.19) спрощується:

$$l_{зв} = l\frac{F_{зв}}{F}. \qquad (7.20)$$

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

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

Струми (потужності) окремих віток рівні між собою:

$$I = I_1 = I_2 = ... = I_n. \qquad (7.22)$$

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

$$z_{\Sigma} = \frac{y_1 + y_2 \quad 1 \quad ,}{+ .. + y_n} \qquad (7.23)$$

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

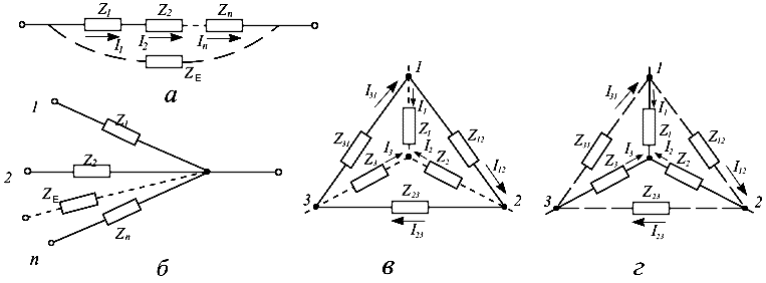

Рис. 7.3. Схеми перетворення електричних мереж:
а – послідовне з'єднання віток; б – паралельне з'єднання віток: в – перетворення трикутника в зірку; г – перетворення зірки
в трикутник

Для двох віток: $z_\Sigma = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$. (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:

$$I_1 z_1 = I_2 z_2 = \ldots = I_n z_n = Iz, \qquad (7.25)$$

звідки:

$$I_1 = I \frac{z}{z_1}; \quad I_2 = I \frac{z}{z_2}$$

$$;\ldots;\ I = I^{z} \qquad . \qquad (7.26)$$

$$n \qquad \frac{n}{z}$$

У разі однорідних проводів:

$$I = I^{l_1}; I = I^{l_2}; \ldots; I = I^{l_n}. \quad (7.27)$$

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 віт- ки 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:*

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3} z_{AB}} + \frac{\dot{i}_1(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + \dot{i}_2(z_{23} + z_{3B}) + \dot{i}_3 z_{3B}}{z_{AB}}. \quad (7.28)$$

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:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3} z_{AB}} + \frac{(\dot{i}_1 + \dot{i}_{21})(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + (\dot{i}_3 + \dot{i}_{23}) z_{3B}}{z_{AB}}. \quad (7.29)$$

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

$$\dot{i}_1(z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + \dot{i}_2(z_{23} + z_{3B}) + \dot{i}_3 z_{3B} =$$

$$(\dot{I}_1 + \dot{I}_{21})(Z_{12} + Z_{23} + Z_{3B}) + (\dot{I}_3 + \dot{I}_{23})Z_{3B}.$$

Розкривши дужки, дістанемо:

$$\dot{I}_2 z_{23} + \dot{I}_2 z_{3B} = \dot{I}_1 (z_{12} + z_{23} + z_{3B}) + \dot{I}_2 (z_{23} + z_{3B}) + \dot{I}_3 z_{3B}. \quad (7.30)$$

Оскільки:

$$\dot{I}_{21} + \dot{I}_{23} = \dot{I}_2, \quad (7.31)$$

маємо:

$$\dot{I}_{23} = \dot{I}_2 - \dot{I}_{21}. \quad (7.32)$$

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

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_2 \frac{z_{23}}{z_{12} + z_{23}}. \quad (7.33)$$

Аналогічно:

$$\dot{I}_{23} = \dot{I}_2 \frac{z_{12}}{z_{12} + z_{23}}. \quad (7.34)$$

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

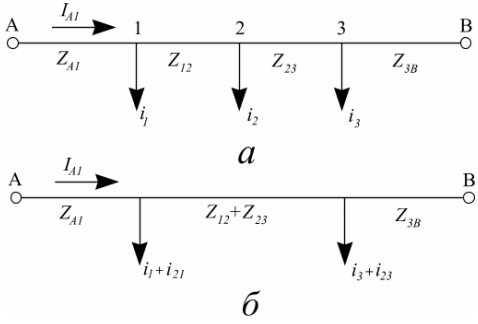

Рис. 7.4. Перенесення навантаження в інші точки

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

$$\left.\begin{aligned} z_1 &= \frac{z_{12} z_{31}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} \\ z_2 &= \frac{z_{23} z_{12}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} \\ z_3 &= \frac{z_{31} z_{23}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} \end{aligned}\right\}. \qquad (7.35)$$

За заданого напрямку струмів у трикутнику струми в еквівалентній зірці:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31} \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23} \end{aligned}\right\}. \qquad (7.36)$$

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

$$z_{12} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3};$$

$$z_{23} = z_2 + z_3 + \frac{z_2 z_3}{z_1}; \qquad (7.37)$$

$$z_{31} = z_3 + z_1 + \frac{z_3 z_1}{z_2}.$$

Спад напруги між точками *1* і *2:*

$$\dot{I}_{12} z_{12} = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}_2 z_2 .$$

Звідки:

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{I}_1 z_1 - \dot{I}_2 z_2}{z_{12}}. \qquad (7.38)$$

Аналогічно:

$$\dot{I}_{23} = \frac{\dot{I}_2 z_2 - \dot{I}_3 z_3}{z_{23}}. \qquad (7.39)$$

$$\dot{I}_{31} = \frac{\dot{I}_3 z_3 - \dot{I}_1 z_1}{z_{31}}$$

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 поширен- ня під час розрахунку замкнутих мереж?