

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 11

ПОПЕРЕЧНА НЕСИМЕТРІЯ

1. Правило еквівалентності для струму прямої послідовності

Звертаючись до отриманих виразів симетричних складових струмів та напруг у місці несиметричного КЗ, зведених у табл. 1, бачимо, що струм зворотної і нульової послідовностей  $I_{kA2}$  та  $I_{kA0}$ , повні струми у пошкоджених фазах  $I_{kA}$ ,  $I_{kB}$ ,  $I_{kC}$  напруга всіх послідовностей  $U_{kA1}$ ,  $U_{kA2}$ ,  $U_{kA0}$  – пропорційні струму прямої послідовності у місці КЗ. Отже, розрахунок будь-якого виду несиметричного КЗ полягає передусім у визначенні струму прямої послідовності в місці КЗ.

Струм прямої послідовності фази  $A$  за будь-якого виду несиметричного КЗ:

$$i_{kA1}^{(n)} = \dot{E}_{A\Sigma} / \left( \underline{Z}_{\text{перз}} + \underline{Z}_{\Delta}^{(n)} \right), \quad (1)$$

де індекс  $(m)$  означає вид КЗ;  $\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$  – додатковий опір залежно від виду КЗ (табл. 7.1).

З урахуванням того, що фазні струми у місці КЗ пропорційні струму прямої послідовності особливої фази  $A$ , модуль періодичної складової струму особливої фази  $A$  в місці несиметричного КЗ у загальному вигляді одержимо за виразом

$$i_{\Pi A}^{(n)} = m^{(n)} i_{kA1}^{(n)}, \quad (2)$$

де  $m^{(n)}$  – коефіцієнт пропорційності (табл. 7.1).

Узагальнений запис (2) дає можливість сформулювати правило еквівалентності для струму прямої послідовності: струм прямої послідовності будь-якого виду несиметричного КЗ може бути визначений як струм умовного трифазного КЗ, віддаленого від дійсного місця КЗ на додатковий опір  $\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$ , який для кожного виду КЗ отримуємо своїм сполученням результуючих опорів зворотної та нульової послідовностей.

Для напруги  $U_{kA1}$  (табл. 7.1) справедливе

$$\dot{U}_{kA1}^{(n)} = \underline{Z}_{\Delta}^{(n)} i_{kA1}^{(n)} \quad (3)$$

– відбиток сформульованого вище правила.

Струм трифазного КЗ можна розрахувати за правилом еквівалентності прямої послідовності при  $m^{(3)}=1$  та  $Z_{\Delta}^{(3)}$ .

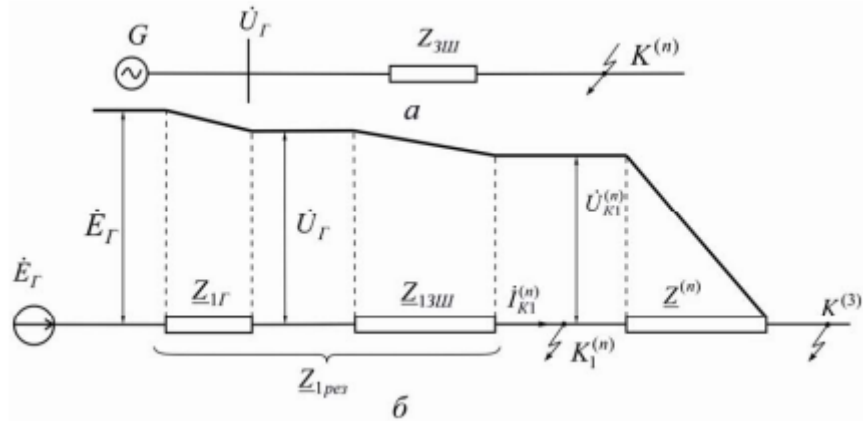


Рис. 1. До визначення струму несиметричного КЗ (а) через струм умовного трифазного КЗ (б)

Рис. 1 ілюструє правило еквівалентності для струму прямої послідовності: при умовному трифазному КЗ у точці  $K^{(3)}$  можуть бути визначені струм та напруга прямої послідовності (у місці заданого несиметричного КЗ).

Таблиця 1

**Вирази симетричних складових, фазних струмів та напруг різних видів несиметричних КЗ (індекс виду КЗ для спрощення не позначено)**

| Розрахункова величина           | Вид несиметричного КЗ   |   |   |
|---------------------------------|---|---|---|
|                                 | двофазне  | двофазне на землю   | однофазне   |
| Струм послідовностей:           |   |   |   |
| прямої $\dot{I}_{\kappa A1}$    | $\dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1\text{pec}} + \underline{Z}_{2\text{pec}})$ | $\dot{E}_{A\Sigma} / [\underline{Z}_{1\text{pec}} + \underline{Z}_{2\text{pec}} \cdot \underline{Z}_{0\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})]$ | $\dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1\text{pec}} + \underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$ |
| зворотної $\dot{I}_{\kappa A2}$ | $-\dot{I}_{\kappa A1}$  | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{0\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$  | $\dot{I}_{\kappa A1}$   |
| нульової $\dot{I}_{\kappa A0}$  | 0   | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$  | $\dot{I}_{\kappa A1}$   |
| Струм фаз:                      |   |   |   |
| А $\dot{I}_{\kappa A}$          | 0   | 0   | $3\dot{I}_{\kappa A1}$  |
| В $\dot{I}_{\kappa B}$          | $\dot{I}_{\kappa A1} (a^2 - a)$   | $\dot{I}_{\kappa A1} [a^2 - (\underline{Z}_{2\text{pec}} + a\underline{Z}_{0\text{pec}}) / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})]$                          | 0   |
| С $\dot{I}_{\kappa C}$          | $\dot{I}_{\kappa A1} (a - a^2)$   | $\dot{I}_{\kappa A1} [a - (\underline{Z}_{2\text{pec}} + a^2\underline{Z}_{0\text{pec}}) / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})]$                          | 0   |
| Напруга послідовностей:         |   |   |   |
| прямої $\dot{U}_{\kappa A1}$    | $\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}}$                                 | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}} \underline{Z}_{0\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$                                      | $\dot{I}_{\kappa A1} (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$                               |
| зворотної $\dot{U}_{\kappa A2}$ | $\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}}$                                 | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}} \underline{Z}_{0\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$                                      | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}}$  |
| нульової $\dot{U}_{\kappa A0}$  | 0   | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{2\text{pec}} \underline{Z}_{0\text{pec}} / (\underline{Z}_{2\text{pec}} + \underline{Z}_{0\text{pec}})$                                      | $-\dot{I}_{\kappa A1} \underline{Z}_{0\text{pec}}$  |

| Розрахункова величина        | Вид несиметричного КЗ                  |  |   |
|------------------------------|--|--|---|
|                              | двофазне                               | двофазне на землю  | однофазне   |
| Напряга фаз:                 |  |  |   |
| А $\dot{U}_{кА}$             | $\dot{I}_{кА1} \cdot 2Z_{2\text{pez}}$ | $\dot{I}_{кА1} \cdot 3Z_{2\text{pez}} Z_{0\text{pez}} / (Z_{2\text{pez}} + Z_{0\text{pez}})$ | 0   |
| В $\dot{U}_{кВ}$             | $-\dot{I}_{кА1} Z_{2\text{pez}}$       | 0  | $\dot{I}_{кА1} \left[ \begin{matrix} (a^2 - a)Z_{2\text{pez}} + \\ + (a^2 - 1)Z_{0\text{pez}} \end{matrix} \right]$ |
| С $\dot{U}_{кС}$             | $-\dot{I}_{кА1} Z_{2\text{pez}}$       | 0  | $\dot{I}_{кА1} \left[ \begin{matrix} (a - a^2)Z_{2\text{pez}} + \\ + (a - 1)Z_{0\text{pez}} \end{matrix} \right]$   |
| Додатковий опір $Z_{\Delta}$ | $Z_{2\text{pez}}$                      | $Z_{2\text{pez}} Z_{0\text{pez}} / (Z_{2\text{pez}} + Z_{0\text{pez}})$                      | $Z_{2\text{pez}} + Z_{0\text{pez}}$   |
| Коефіцієнт $m$               | $\sqrt{3}$                             | $ a^2 - (Z_{2\text{pez}} + aZ_{0\text{pez}}) / (Z_{2\text{pez}} + Z_{0\text{pez}}) $         | 3   |
| Струм в землі $\dot{I}_3$    | 0                                      | $-\dot{I}_{кА1} \cdot 3Z_{2\text{pez}} / (Z_{2\text{pez}} + Z_{0\text{pez}})$                | $3\dot{I}_{кА1}$  |

Струм прямої послідовності у місці КЗ, а також струми інших послідовностей залежать від опору елементів усіх послідовностей даної схеми (включаючи опір дуги). Так, якщо нейтраль трансформатора, на виводах якого одно- або двофазне КЗ на землю, заземлити через будь-який опір, то це позначиться на струмах усіх послідовностей, хоч струми прямої та зворотної послідовностей цим опором і не перебігають.

Як наслідок застосування правила еквівалентності для струму прямої послідовності – такий висновок: отримані раніше вирази для визначення струму трифазного КЗ та методи його розрахунку поширюються на розрахунки несиметричних видів КЗ за означеною схемою.

Так, зміну у часі діючого значення періодичної складової струму прямої послідовності генератора без демпферних обмоток з урахуванням АРЗ (при тиристорній системі збудження) та будь-якого  $n$  несиметричного КЗ за суто індуктивним зовнішнім опором  $x_{3\text{зи}}$  подамо:

$$I_{\text{п1}t}^{(n)} = I_{\text{сп1}}^{(n)} + \left( I_{1(0)}^{(n)} - I_{\text{сп1}}^{(n)} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} \leq \frac{U_n}{x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)}}. \quad (4)$$

Тут  $I_{\text{сп1}}^{(n)}$  – усталений струм прямої послідовності при граничному струмі збудження:

$$I_{\text{сп1}}^{(n)} = E_{q\text{сп}} / \left( x_d + x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)} \right); \quad (5)$$

$I_{1(0)}^{(n)}$  – початковий перехідний струм прямої послідовності:

$$T_d^{(n)} = T_{f0} \left( x_d' + x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)} \right) / \left( x_d + x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)} \right). \quad (6)$$

$T_d^{(n)}$  – постійна часу затухання вільного перехідного струму прямої послідовності:

$$T_d^{(n)} = T_{f0} \left( x_d' + x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)} \right) / \left( x_d + x_{13\text{зи}} + x_A^{(n)} \right). \quad (7)$$

Обмеження у виразі (4) зумовлене тим, що під дією регулювання збудженням напруга прямої послідовності генераторів не може перевищити номінального значення. Періодична складова повного струму змінюватиметься

за законом, наявним у виразі (2). Достатньо обидва доданки (4) помножити на  $m^{(n)}$ , аби отримати його значення у різні моменти часу.

Вирази, що описують перехідний процес у колі статора генератора з демпферними обмотками за будь-якого виду КЗ, аналогічні подібним виразам при трифазному КЗ (розд. 4). Важливо відзначити, що значення струму прямої послідовності у місці КЗ, визначене за (4), а також пов'язані з ним значення струмів інших послідовностей залежать від опору всіх послідовностей елементів аналізованої схеми заміщення.

Істотні особливості перехідного процесу при несиметричних коротких замиканнях порівняно з трифазним КЗ простежуються в характері зміни перехідної складової струму статора. Прослідкуємо ці особливості на прикладі, коли несиметричне КЗ відбувається за суто індуктивним опором у колі статора генератора без демпферних обмоток з тиристорною системою збудження. Зміна у часі діючого значення періодичної складової струму прямої послідовності описана виразом (4).

Вважаючи, що короткі замикання різних видів відбуваються по черзі в одній і тій самій точці мережі і за тих же умов, на основі даних табл. 1 для додаткових опорів можна записати такі нерівності (обмежимося тільки індуктивним опором):

$$x_A^{(1)} > x_A^{(2)} > x_A^{(1,1)} > x_A^{(3)} = 0. \quad (8)$$

Для струмів прямої послідовності у місці КЗ за (1) справедливі нерівності:

$$I_{KA1}^{(1)} < I_{KA1}^{(2)} < I_{KA1}^{(1,1)} < I_{KA1}^{(3)}. \quad (9)$$

Для напруг прямої послідовності відповідно до (1) та (3) мають місце співвідношення:

$$U_{KA1}^{(1)} > U_{KA1}^{(2)} > U_{KA1}^{(1,1)} > U_{KA1}^{(3)} = 0. \quad (10)$$

Постійні часу затухання перехідної складової струму при різних видах КЗ за (7) зв'язані нерівностями:

$$T_d^{(1)} > T_d^{(2)} > T_d^{(1,1)} > T_d^{(3)}. \quad (11)$$

Як видно з цих співвідношень, чим більший додатковий опір  $x_{\Delta}^{(n)}$ , що характеризує вид несиметричного КЗ, тим повільніший перехідний процес у колі статора генератора. Повільніше всього затухає струм при однофазному КЗ на землю. Дія АРЗ, що реагує на зміну напруги прямої послідовності, теж залежить від  $x_{\Delta}^{(n)}$ . Із зростанням значень  $x_{\Delta}^{(n)}$  процес форсування збудження уповільнюється. У зв'язку з тим, що під час збільшення значень  $x_{\Delta}^{(n)}$  напруга прямої послідовності генератора знижується менше, то і її відновлення (якщо можливо) відбувається за коротший проміжок часу. Отже, тим раніше настане усталений режим.

Для еквівалентної постійної часу затухання аперіодичної складової струму статора при будь-якому виді КЗ (за правилом еквівалентності для струму прямої послідовності) напишемо вираз у загальному вигляді:

$$T_{a\text{pez}}^{(n)} = \frac{x_{2\text{pez}} + x_{\Delta}^{(n)}}{\omega r_{1\text{pez}} + r_{\Delta}^{(n)}}, \quad (12)$$

де  $r_{\Delta}^{(n)}$  – активна складова опору, додаткового для даного виду КЗ, що визначається, як і  $x_{\Delta}^{(n)}$ , за умови, що індуктивні складові опору дорівнюють нулю.

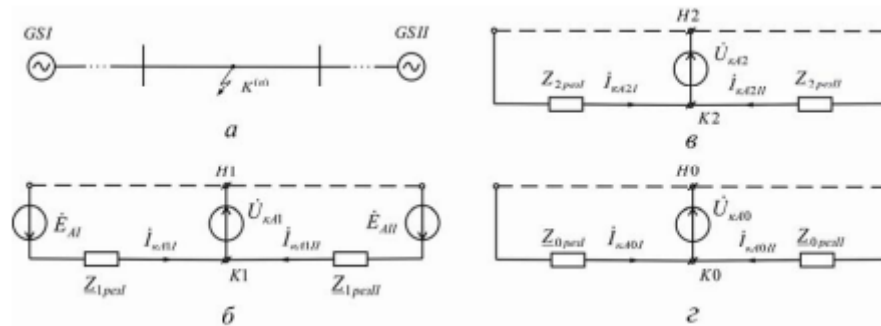


Рис. 2. Система електропостачання з двостороннім живленням при несиметричному КЗ: а – розрахункова схема; б, в, г – схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно для особливої фази А

## 2. Комплексні схеми заміщення

Співвідношення між симетричними складовими струмів та напруги у місці КЗ дають змогу для кожного виду несиметричного КЗ, використовуючи результуючі е.р.с. та опори окремих послідовностей, скласти так звані комплексні схеми заміщення (для особливої фази А в однолінійному зображенні).

На рис. 2 – розрахункова схема СЕП з двостороннім живленням місця КЗ (на лінії електропередачі у точці  $K^{(n)}$ ), де виникла поперечна несиметрія, та відповідні їй схеми заміщення для особливої фази А прямої, зворотної та нульової послідовностей. При складанні комплексних схем заміщення за позитивний беруть напрямок струму від початку  $H1$  ( $H2, H0$ ) схеми заміщення послідовності до її кінця  $K1$  ( $K2, K0$ ) – точки КЗ. Щоб отримати комплексну схему заміщення, необхідно з'єднати між собою по затискачах  $H1$  ( $H2, H0$ ) і  $K1$  ( $K2, K0$ ) схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей стосовно до одержаних співвідношень для струмів та напруг особливої фази А відповідного виду КЗ.

На рис. 3 – комплексна схема заміщення при однофазному КЗ, складена зі схеми заміщення прямої послідовності та еквівалентних схем заміщення зворотної і нульової послідовностей (рис. 2) за виразом

$$\dot{U}_{KA1}^{(1)} + \dot{U}_{KA2}^{(1)} + \dot{U}_{KA0}^{(1)} = 0.$$

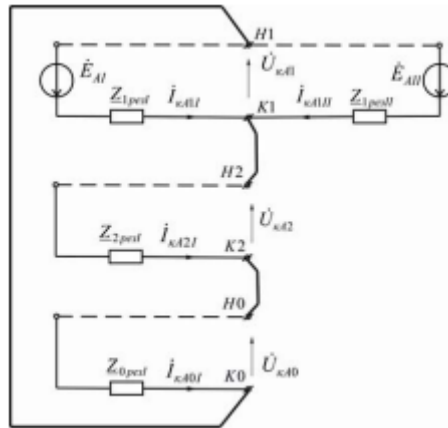


Рис. 3. Комплексна схема заміщення для особливої фази А при однофазному КЗ

В комплексній схемі заміщення виконується співвідношення струмів:

$$\dot{i}_{kA1}^{(1)} = \dot{i}_{kA2}^{(1)} = \dot{i}_{kA0}^{(1)}$$

Комплексна схема заміщення при двофазному КЗ зображена на рис. 4 і складена на основі співвідношень для напруг послідовностей

$$\dot{U}_{kA1}^{(2)} = \dot{U}_{kA2}^{(2)}; \dot{U}_{kA0}^{(2)} = 0.$$

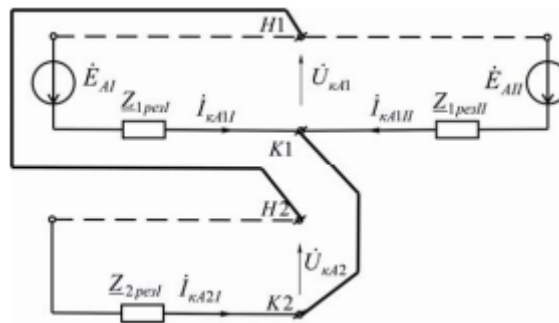


Рис. 4. Комплексна схема заміщення для особливої фази А при двофазному КЗ

Струми у вітках цієї схеми відповідають умовам

$$\dot{i}_{kA1}^{(2)} = -\dot{i}_{kA2}^{(2)}; \dot{i}_{kA0}^{(2)} = 0.$$

Двофазному КЗ на землю відповідає комплексна схема заміщення (рис.5), що складена за співвідношеннями напруг послідовностей,

$$\dot{U}_{kA1}^{(1,1)} = \dot{U}_{kA2}^{(1,1)} = \dot{U}_{kA0}^{(1,1)}$$

У вітках схеми заміщення для струмів послідовностей розв'язується тотожність з

$$\dot{i}_{kA1}^{(1,1)} = -(\dot{i}_{kA2}^{(1,1)} + \dot{i}_{kA0}^{(1,1)})$$

До розрахунків з комплексними схемами заміщення складають еквівалентні схеми окремих послідовностей, після чого їх сполучають між собою (рис. 3 – 5) для потрібного виду КЗ. Для визначення струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, що перебігають у тому чи іншому елементі, в комплексній схемі заміщення спочатку необхідно знайти опір, яким

моделюється даний елемент у схемах прямої, зворотної та нульової послідовностей, а далі обчислити струми, що перебігають вітками з цим опором. Напругу окремої послідовності для заданого вузла комплексної схеми заміщення визначають як напругу вузла відносно початку схеми заміщення цієї послідовності.

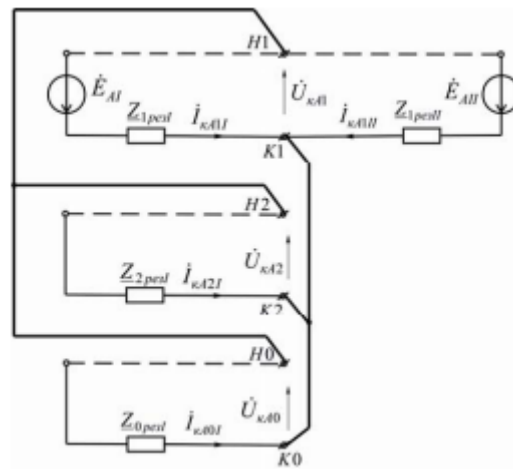


Рис. 5. Комплексна схема заміщення для особливої фази А при двофазному КЗ на землю

Комплексними схемами заміщення зручно користуватися в розрахунках несиметричних КЗ із застосуванням статичних моделей (значення струмів та напруг окремих послідовностей виміряють).

### 3. Порівняння струмів при різних видах короткого замикання

Порівняльна оцінка струмів КЗ різного виду має також практичне застосування. Для її отримання за відомим для даної точки СЕП значенням струму трифазного КЗ, обчислення якого простіше, ніж решти КЗ, треба оцінити у першому наближенні можливі значення струму при несиметричних видах КЗ. Визначені нижче граничні співвідношення справедливі лише для струмів у певному місці КЗ при  $t = 0$ .

Струм у місці КЗ будь-якого виду визначимо за виразом (при  $r \rightarrow 0$ )

$$I_{II}^{(n)} = m^{(n)} I_{кA1}^{(1)} = m^{(n)} E_{A\Sigma} / (x_{1pez} + x_A^{(n)}). \quad (13)$$

Відношення значень періодичних складових струму будь-якого несиметричного виду КЗ до періодичної складової струму трифазного КЗ подамо як

$$K^{(n;3)} = \frac{I_{II}^{(n)}}{I_{II}^{(3)}} = \frac{m^{(n)} E_{A\Sigma}^{(n)} / (x_{1pez} + x_A^{(n)})}{E_{A\Sigma}^{(3)} / x_{1pez}} = \frac{m^{(n)} E_{A\Sigma}^{(n)} / E_{A\Sigma}^{(3)}}{1 + x_A^{(n)} / x_{1pez}}. \quad (14)$$

Вираз (14) ураховує схему заміщення генератора для прямої послідовності (з відповідною е.р.с.) і його можна вважати справедливим для будь-якого моменту часу. В наближеній оцінці інтервалу зміни  $K^{(n;3)}$

відмінностями  $E_{A\Sigma}^{(n)}$  та  $E_{A\Sigma}^{(3)}$  можна нехтувати і вважати, що рівність  $E_{A\Sigma}^{(n)}$  та  $E_{A\Sigma}^{(3)}$  справедлива для моменту часу  $t = 0$ . Внаслідок цього вираз (14) спрощено:

$$K^{(n;3)} = m^{(n)} / \left(1 + x_d^{(n)} / x_{1\text{рез}}\right). \quad (15)$$

За цього припущення найбільша похибка спостерігається під час визначення співвідношення усталених значень даних струмів або близьких до усталених, оскільки при трифазному КЗ біля затискачів генератор еквівалентно задається у схемі заміщення е.р.с.  $E_{q,sp}$  та опором  $x_d$ , а при однофазному КЗ е.р.с., рівній номінальній напрузі, та опором (дорівнює нулю). Цей випадок, однак, не має практичного інтересу.

Граничні значення відношення  $K^{(n;3)}$  (різні види КЗ).

Двофазне КЗ. За даними табл. 1  $m^{(2)} = \sqrt{3}$ ,  $x_d^{(2)} \approx x_{2\text{рез}}$ , тоді з виразу (15)

$$K^{(2;3)} = \sqrt{3} / \left(1 + x_{2\text{рез}} / x_{1\text{рез}}\right). \quad (16)$$

Проаналізуємо значення  $K^{(2;3)}$  при КЗ біля генератора та КЗ у віддаленій точці.

Для КЗ біля генератора хзш 0 у початковий момент часу КЗ

$$x_{1\Gamma} = x_d'', \quad x_{2\Gamma} \approx x_d''.$$

Отже,

$$x_{1\text{рез}} \approx x_{2\text{рез}} \text{ та } K^{(2;3)} = \sqrt{3}/2. \quad (17)$$

В усталеному режимі ( $t \rightarrow \infty$ ), якщо  $x_{1\Gamma} = x_d$ ,  $x_{2\Gamma} \ll x_d$  та  $x_{1\text{рез}} \gg x_{2\text{рез}}$  можна вважати  $x_{2\text{рез}} \approx 0$ . Тоді  $K^{(2;3)} \rightarrow 3$ .

Таким чином, відношення  $K^{(2;3)}$  перебуває у межах

$$\sqrt{3}/2 \leq K^{(2;3)} < \sqrt{3}. \quad (18)$$

При КЗ у віддаленій точці стосовно до генератора  $x_{3ш}$  значне. Наприклад, це може бути у СЕП промислового підприємства середньої потужності без власної ТЕС. У цьому разі

$$x_{2\text{рез}} / x_{1\text{рез}} = (x_{2\Gamma} + x_{3ш}) / (x_{1\Gamma} + x_{3ш}) \approx 1 \quad (19)$$

незалежно від моменту часу виникнення  $K^{(2;3)} = \sqrt{3}/2$ . Це означає, що між струмами дво- та трифазного КЗ протягом усього перехідного процесу зберігається приблизно постійне співвідношення:  $I_{II}^{(2;3)} \approx (\sqrt{3}/2) I_{II}^{(3)}$ .

Однофазне КЗ. З табл.  $m^{(1)} = 3$ ;  $x_d^{(1)} = x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}$ , тоді за (15) коефіцієнт кратності

$$K^{(1;3)} = 3 / \left[1 + (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) / x_{1\text{рез}}\right] = 3 / \left(1 + x_{2\text{рез}} / x_{1\text{рез}} + x_{0\text{рез}} / x_{1\text{рез}}\right), \quad (20)$$

що відчутно залежить від значення опору нульової послідовності.

Значення індуктивного опору  $x_{0\text{рез}}$  зазнає змін у межах (практично від 0 до  $\infty$ ) і може змінюватися від кількості заземлених нейтралей трансформаторів у мережах напругою 110 кВ та вище.



Звернемо увагу на інтервал значень  $K^{(1;3)}$  при КЗ біля генератора. Коли  $x_{3ш} \rightarrow 0$ , а  $x_{1рез} \gg x_{2рез}$ , можна вважати, що  $x_{2рез}/x_{1рез} \approx 0$ . Тоді при  $x_{0рез} \approx 0$  граничне значення  $K^{(1;3)} \rightarrow 3$ , а при  $x_{0рез} \rightarrow \infty$  маємо  $K^{(1;3)} = 0$ .

Отже, значення коефіцієнта  $K^{(1;3)}$  буде в інтервалі

$$0 \leq K^{(1;3)} < 3. \quad (21)$$

При КЗ у віддаленій точці електричної системи  $x_{1рез} \approx x_{2рез}$  і при  $x_{0рез} = 0$  та  $x_{0рез} \rightarrow \infty$  граничні значення коефіцієнта

$$0 \leq K^{(1;3)} < 1,5. \quad (22)$$

Зміна значень коефіцієнта  $K^{(1;3)}$  залежно від відношення  $x_{0рез}/x_{1рез}$  при КЗ у віддаленій точці зображена на рис. 6.

Двофазне КЗ на землю. З табл. 1 відомі  $m^{(1,1)}$  та  $x_{\Delta}^{(1,1)}$ , тоді за виразом (15)

$$K^{(1,1-3)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - x_{2рез}x_{0рез} / (x_{2рез} + x_{0рез})^2} / [1 + (x_{2рез}x_{0рез} / (x_{2рез} + x_{0рез}) / x_{1рез})] \quad (23)$$

Залежно від співвідношення  $x_{2рез}/x_{0рез}$  значення  $m^{(1,1)}$  перебуває в інтервалі (верхня межа відповідає  $x_{2рез}/x_{0рез}$ , що дорівнює нулю або нескінченності, а нижня  $x_{2рез} = x_{0рез}$ )

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}.$$

Якщо  $x_{0рез} = 0$ , то  $K^{(1,1-3)} = \sqrt{3}$ . Коли  $x_{0рез}$ , комплексна схема заміщення при  $K^{(1,1)}$  (рис. 5) перетвориться на її подібну при  $K^{(2)}$  (рис.4), у результаті чого

$$K^{(1,1-3)} = \sqrt{3}(1 + x_{2рез}/x_{1рез}). \quad (24)$$

При КЗ у віддаленій точці, де  $x_{2рез} \approx x_{1рез}$ , маємо

$$K^{(1,1-3)} = \sqrt{3}/2. \quad (25)$$

Тому значення коефіцієнта  $K^{(1,1-3)}$  змінюються в проміжку

$$\sqrt{3}/2 \leq K^{(1,1-3)} \leq \sqrt{3}, \quad (26)$$

як і за двофазного КЗ.

Зміна значень коефіцієнта  $K^{(1,1-3)}$  залежно від відношення  $x_{0рез}/x_{1рез}$  при КЗ у віддаленій точці – на рис. 6, з якого виходить, що коли  $x_{0рез}/x_{1рез} = 0, 2 \dots 1$ , струм однофазного КЗ не набагато більший за струм двофазного КЗ на землю, тоді як для решти значень  $x_{0рез}/x_{1рез}$  має місце зворотне співвідношення.

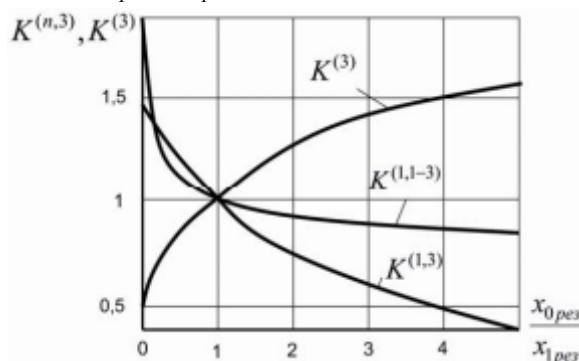


Рис. 6. Співвідношення між струмами різних видів КЗ залежно від співвідношення опорів  $x_{0рез}/x_{1рез}$

Практичний інтерес являє собою також порівняння значень струму на землю при одно- та двофазному КЗ на землю. Відношення  $K^{(3)} = I_3^{(1)} / I_3^{(1,1)} = I_K^{(1)} / I_K^{(1,1)}$  можна записати так:

$$K^{(3)} = \frac{x_{1рез}x_{2рез} + x_{0рез}x_{1рез} + x_{2рез}x_{0рез}}{x_{1рез}x_{2рез} + x_{2рез}^2 + x_{2рез}x_{0рез}}, \quad (27)$$

звідки залежно від співвідношення між  $x_{2рез}$  та  $x_{1рез} x_{0рез}$  може бути  $K^{(3)} > 1$  чи  $K^{(3)} < 1$ . При  $x_{2рез} = x_{1рез}$  вираз набере вигляду:

$$K^{(3)} = (1 + 2x_{0рез}/x_{1рез}) / (2 + x_{0рез}/x_{1рез}). \quad (28)$$

Зміну  $K^{(3)}$  залежно від відношення  $x_{0рез}/x_{1рез}$  ілюструє відповідна крива на рис. 7.12. Як видно, лише за  $x_{0рез} = x_{1рез}$  струми в землі для порівняльних видів КЗ однакові. При  $x_{0рез} > x_{1рез}$  струм у землі більший, ніж за однофазного КЗ, а коли  $x_{0рез} < x_{1рез}$ , він такий же при двофазному КЗ на землю. Співвідношення (27) та (28) дійсні для струмів нульової послідовності будь-якої вітки схеми, оскільки вони пропорційні струмам у місці КЗ.

#### 4. Трансформація симетричних складових струмів та напруг окремих послідовностей

Обчислені з використанням симетричних складових окремих послідовностей фазні струми віток та напруги вузлів дійсні лише для ділянок розрахункової схеми, електрично з'єднаних з точкою КЗ. Це зумовлене тим, що при визначенні параметрів елементів схеми заміщення ми користуємося лінійними значеннями (модулями) коефіцієнтів трансформації, тобто не враховуємо груп з'єднань обмоток трансформаторів. Під час трансформації векторів струмів та напруг змінюються значення їх модулів і кути. Фази комплексних коефіцієнтів трансформації можна врахувати, зміщуючи обчислені складові струмів у вітках та напруг у вузлах схеми на кути, які визначаються групами з'єднань обмоток трансформаторів.

При переході через трансформатор з непарною групою з'єднань обмоток  $Y/\Delta-N$  ( $N$  – номер групи з'єднань обмоток 1, 3, 5, 7, 9, 11) вектори фазних напруг та струмів зміщуються. Як типові взято групи з'єднань обмоток трансформаторів  $Y/Y-0$  та  $Y/\Delta-11$ .

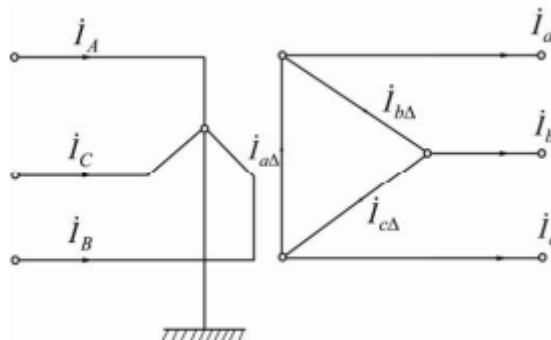


Рис. 7. Розподіл струмів при з'єднанні обмоток трансформатора за схемою  $Y_0/\Delta$ -11

Звернемося до рис. 7, де зображено трансформатор із з'єднанням обмоток за схемою  $Y/\Delta$ -11. При заданих фазних струмах у первинній обмотці  $I_A, I_B, I_C$ , відповідно до взятих на рис. 7 позитивних напрямків, струми у фазних провідниках за обмоткою, з'єднаною трикутником,

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{ad} - \dot{I}_{bd} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B)w_Y/w_\Delta = (\dot{I}_A - \dot{I}_B)K/\sqrt{3} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{bd} - \dot{I}_{cd} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C)w_Y/w_\Delta = (\dot{I}_B - \dot{I}_C)K/\sqrt{3} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{cd} - \dot{I}_{ad} = (\dot{I}_C - \dot{I}_A)w_Y/w_\Delta = (\dot{I}_C - \dot{I}_A)K/\sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

або в матричній формі запису

$$\begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix} = \frac{K}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{vmatrix} = \frac{K}{\sqrt{3}} A^{(11)} \begin{vmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{vmatrix}, \quad (30)$$

де  $K$  – лінійний коефіцієнт трансформації, що дорівнює відношенню номінальних лінійних напруг трансформатора. Якщо кількість витків обмоток високої та низької напруг трансформатора позначити  $w_Y$  і  $w_\Delta$ , а за основний ступінь взяти високу напругу  $U_{BH}$ , то лінійний коефіцієнт трансформації для трансформаторів з непарною групою з'єднання обмоток становитиме:

$$K = \sqrt{3} w_Y/w_\Delta \approx U_{BH}/U_{HH}. \quad (31)$$

Для трансформаторів з парною групою з'єднання обмоток

$$K = w_Y/w_\Delta. \quad (32)$$

Струми можна виразити з боку обмотки трансформатора, з'єднаної на зірку при заданих струмах  $I_a, I_b, I_c$  від обмотки, з'єднаної на трикутник:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A - \dot{I}_0 &= (\dot{I}_a - \dot{I}_c)/(K\sqrt{3}) \\ \dot{I}_B - \dot{I}_0 &= (\dot{I}_b - \dot{I}_a)/(K\sqrt{3}) \\ \dot{I}_C - \dot{I}_0 &= (\dot{I}_c - \dot{I}_b)/(K\sqrt{3}) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

чи в матричному вигляді

$$\begin{vmatrix} \dot{I}_A - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_B - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_C - \dot{I}_0 \end{vmatrix} = \frac{1}{K\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix} = \frac{1}{K\sqrt{3}} B^{(11)} \begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix}. \quad (34)$$

Вирази (29) та (33) видозмінимо, записавши струми через симетричні складові послідовностей для особливої фази  $A$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} - a^2\dot{I}_{A1} - a\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{A0})K/\sqrt{3} = (\dot{I}_{A1}e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2}e^{-j30^\circ})K \\ \dot{I}_b &= (a^2\dot{I}_{A1} + a\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} - a\dot{I}_{A1} - a^2\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{A0})K/\sqrt{3} = (\dot{I}_{A1}e^{j90^\circ} + \dot{I}_{A2}e^{-j90^\circ})K \\ \dot{I}_c &= (a\dot{I}_{A1} + a^2\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} - \dot{I}_{A1} - \dot{I}_{A2} - \dot{I}_{A0})K/\sqrt{3} = (\dot{I}_{A1}e^{j150^\circ} + \dot{I}_{A2}e^{-j150^\circ})K \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

та

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A - \dot{I}_0 &= (\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} - a\dot{I}_{a1} - a^2\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{a0})/(K\sqrt{3}) = (\dot{I}_{a1}e^{-j30^\circ} + \dot{I}_{a2}e^{j30^\circ})/K \\ \dot{I}_B - \dot{I}_0 &= (a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} - \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{a0})/(K\sqrt{3}) = (\dot{I}_{a1}e^{-j150^\circ} + \dot{I}_{a2}e^{j150^\circ})/K \\ \dot{I}_C - \dot{I}_0 &= (a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} - a^2\dot{I}_{a1} - a\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{a0})/(K\sqrt{3}) = (\dot{I}_{a1}e^{j90^\circ} + \dot{I}_{a2}e^{-j90^\circ})/K \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Подібні перетворення здійснимо і для виразів напруг. Напруги з обох боків обмоток трансформатора, виражені через симетричні складові послідовностей, для особливої фази  $A$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= (\dot{U}_{A1} e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{j30^\circ}) K \\ \dot{U}_b &= (\dot{U}_{A1} e^{-j90^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{j90^\circ}) K \\ \dot{U}_c &= (\dot{U}_{A1} e^{j150^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j150^\circ}) K \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

та

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= (\dot{U}_{a1} e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{a2} e^{j30^\circ}) K \\ \dot{U}_B &= (\dot{U}_{a1} e^{-j150^\circ} + \dot{U}_{a2} e^{j150^\circ}) K \\ \dot{U}_C &= (\dot{U}_{a1} e^{j90^\circ} + \dot{U}_{a2} e^{-j90^\circ}) K \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

За виразами (37) та (38) фазні напруги встановлюють відносно нульової точки системи векторів, а в режимах, коли відсутні складові нульової послідовності, – відносно землі. Структура виразів (35) та (37) свідчить про те, що у трансформатора з групою з'єднання обмоток  $Y_0/\Delta-11$  при переході з боку зірки на бік трикутника вектори прямої послідовності повертаються на  $30^\circ$  у протилежному напрямку (рис. 8). Під час переходу через трансформатор у зворотному напрямку кутові зміщення такі, що вектори симетричних складових послідовностей змінюють свій знак на протилежний, що й підтверджено виразами (36) та (38).

Аналогічні перетворення можна провести і для інших груп з'єднання обмоток трансформаторів. Візьмемо, наприклад, трансформатор з  $N$ -групою з'єднання обмоток. За аналогією з виразами (30) та (34) отримаємо співвідношення між струмами з різних боків обмоток трансформатора:

$$\begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix} = \frac{K}{\sqrt{3}} A^{(N)} \begin{vmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{vmatrix} \quad \text{та} \quad \begin{vmatrix} \dot{I}_A - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_B - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_C - \dot{I}_0 \end{vmatrix} = \frac{1}{K\sqrt{3}} B^{(N)} \begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix} \quad (39)$$

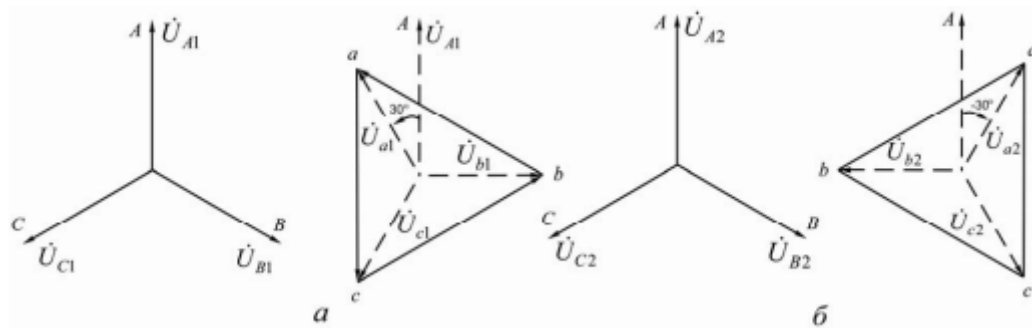


Рис. 8. Симетричні складові векторів для трансформатора з групою з'єднання обмоток  $Y_0/\Delta-11$ : а – прямої послідовності; б – зворотної послідовності

Значення матриць  $A^{(N)}$  та  $B^{(N)}$  для різних груп з'єднання обмоток трансформаторів наведені у табл. 2. Переходячи до симетричних складових послідовностей для особливої фази  $A$  маємо:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{bmatrix} &= S^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = S^{-1} \frac{K}{\sqrt{3}} A^{(N)} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = S^{-1} \frac{K}{\sqrt{3}} A^{(N)} S \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} &= S^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_A - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_B - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_C - \dot{I}_0 \end{bmatrix} = S^{-1} \frac{1}{K\sqrt{3}} B^{(N)} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = S^{-1} \frac{1}{K\sqrt{3}} B^{(N)} S \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

або  $I_{as} = M_S^{I(N)} \cdot I_{AS}$  і  $I_{AS} = N_S^{I(N)} \cdot I_{as}$ ,

де  $M_S^{I(N)} = S^{-1} \frac{K}{\sqrt{3}} A^{(N)} \cdot S$ ;  $N_S^{I(N)} = S^{-1} \frac{1}{K\sqrt{3}} B^{(N)} \cdot S$ ,

чи у розгорненому вигляді:

$$M^{(I)N} = \begin{bmatrix} Ke^{-j30^\circ N} & 0 & 0 \\ 0 & Ke^{j30^\circ N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad N^{(I)N} = \begin{bmatrix} K^{-1}e^{j30^\circ N} & 0 & 0 \\ 0 & K^{-1}e^{-j30^\circ N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (41)$$

За аналогією, використавши вирази (37), (38), (40) та (41), запишемо співвідношення між симетричними складовими напруг для особливої фази  $A$ :

– перетворення зірки на трикутник:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = M^{U(N)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{A2} \\ \dot{U}_{A0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^{-1}e^{-j30^\circ N} & 0 & 0 \\ 0 & K^{-1}e^{j30^\circ N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{A2} \\ \dot{U}_{A0} \end{bmatrix}; \quad (42)$$

– перетворення трикутника на зірку:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{A2} \\ \dot{U}_{A0} \end{bmatrix} = N^{U(N)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ke^{j30^\circ N} & 0 & 0 \\ 0 & Ke^{-j30^\circ N} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

При переході через трансформатор з групою з'єднання обмоток  $12$  вектори симетричних складових струмів та напруг не змінюються за фазою. За виразами (40)–(42) сформулюємо правило трансформації симетричних складових окремих послідовностей: у трансформаторі з  $N$ -групою з'єднання обмоток при переході з боку зірки на бік трикутника вектори струмів та напруг прямої послідовності зміщуються на кут  $-30^\circ N$ , вектори струмів та напруг зворотної послідовності – на кут  $+30^\circ N$  і при переході з боку трикутника на бік зірки кути зміщення відповідних векторів змінюються на  $+30^\circ N$  та  $-30^\circ N$ .

**Значення матриц  $A^{(N)}$  і  $B^{(N)}$  для різних груп з'єднання обмоток трансформаторів**

| Матриця   | № групи  |  |  |
|-----------|--|--|--|
|           | $N=3$  | $N=9$  | $N=11$   |
| $A^{(N)}$ | $\begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ |
| $B^{(N)}$ | $\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix}$ |

При непарній групі з'єднання обмоток, коли про істинне взаємне орієнтування векторних діаграм на обох боках обмоток трансформатора знати не обов'язково, вважатимемо, що його обмотки з'єднані за групою 3 або 9 (табл. 2). При цьому вектори прямої та зворотної послідовностей повернені на  $90^\circ$  у протилежні боки (рис. 9). Напевне, вектори прямої послідовності можна залишити без зміщення, але вектори зворотної послідовності треба змістити на  $180^\circ$ . Звідси наступне правило: при переході через трансформатор із з'єднанням обмоток за схемою  $Y/\Delta$  чи  $\Delta/Y$  достатньо замінити знак на протилежний лише у векторів зворотної послідовності.

Треба взяти до уваги, що відмова від урахування дійсної групи з'єднання обмоток трансформаторів викличе розбіжність у позначеннях лінійних провідників за трансформатором (з маркіруванням відповідно до дійсної групи з'єднання).

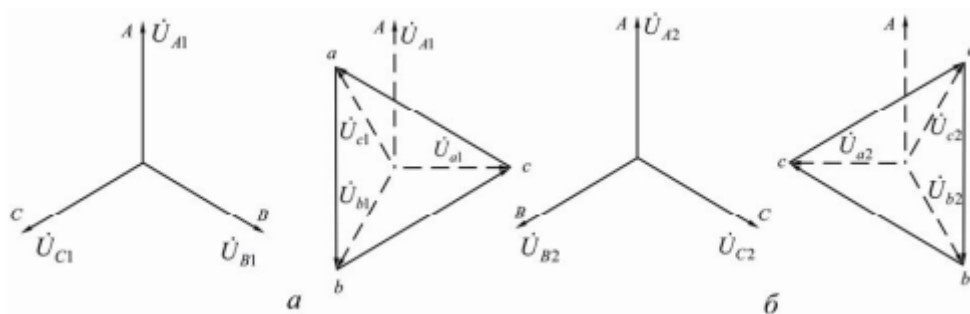


Рис. 9. Симетричні складові векторів для трансформатора з групою з'єднання обмоток  $Y/\Delta=3$  : а – прямої послідовності; б – зворотної послідовності

Якщо вектори струму та напруги подані у відносних одиницях виміру, то при трансформації слід урахувувати лише кутові зміщення, зумовлені відповідною групою з'єднання обмоток трансформатора.

Використовуючи векторні діаграми струмів та напруг для місця КЗ, побудуємо відповідні діаграми у довільній точці даної схеми. На рис. 10 як приклад показані векторні діаграми струмів та напруг за різних видів КЗ у

точках  $\alpha$ ,  $\beta$  (рис. 10,а), розташованих від точки  $K^{(n)}$  на різних обмотках трансформатора. Обмотки трансформатора з'єднані за схемою  $Y/\Delta$ -11. Для спрощення візьмемо коло КЗ, що складається із суто індуктивних опорів. Для порівняння діаграм на обох боках трансформатора вважатимемо, що струми та напруги подані у відносних одиницях виміру або зведені до одного ступеня напруги.

Вектори напруг окремих послідовностей в точках  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K^{(n)}$  даної схеми для кожного несиметричного КЗ зображені на рис. 10,б-г. У міру наближення до генератора напруга прямої послідовності зростає, а напруга зворотної та нульової послідовностей зменшується за абсолютним значенням. При зазначеному на рис. 10,а з'єднанні обмоток трансформатора напруга нульової послідовності за трансформатором відсутня. Як виходить із співвідношення між  $U_{A2}$  та  $U_{A0}$ , у місці однофазного КЗ  $x_{0\text{рез}} > x_{2\text{рез}}$ .

Найбільше викривлення векторної діаграми напруг завжди спостерігається у місці КЗ. Для точок, розташованих ближче до генератора, це викривлення стає все меншим. Повністю симетричною зберігається лише система векторів е.р.с. Через те, що трансформатор має непарну групу з'єднання обмоток, однофазне КЗ з боку з'єднання обмоток на зірку сприймається генератором як двофазне.

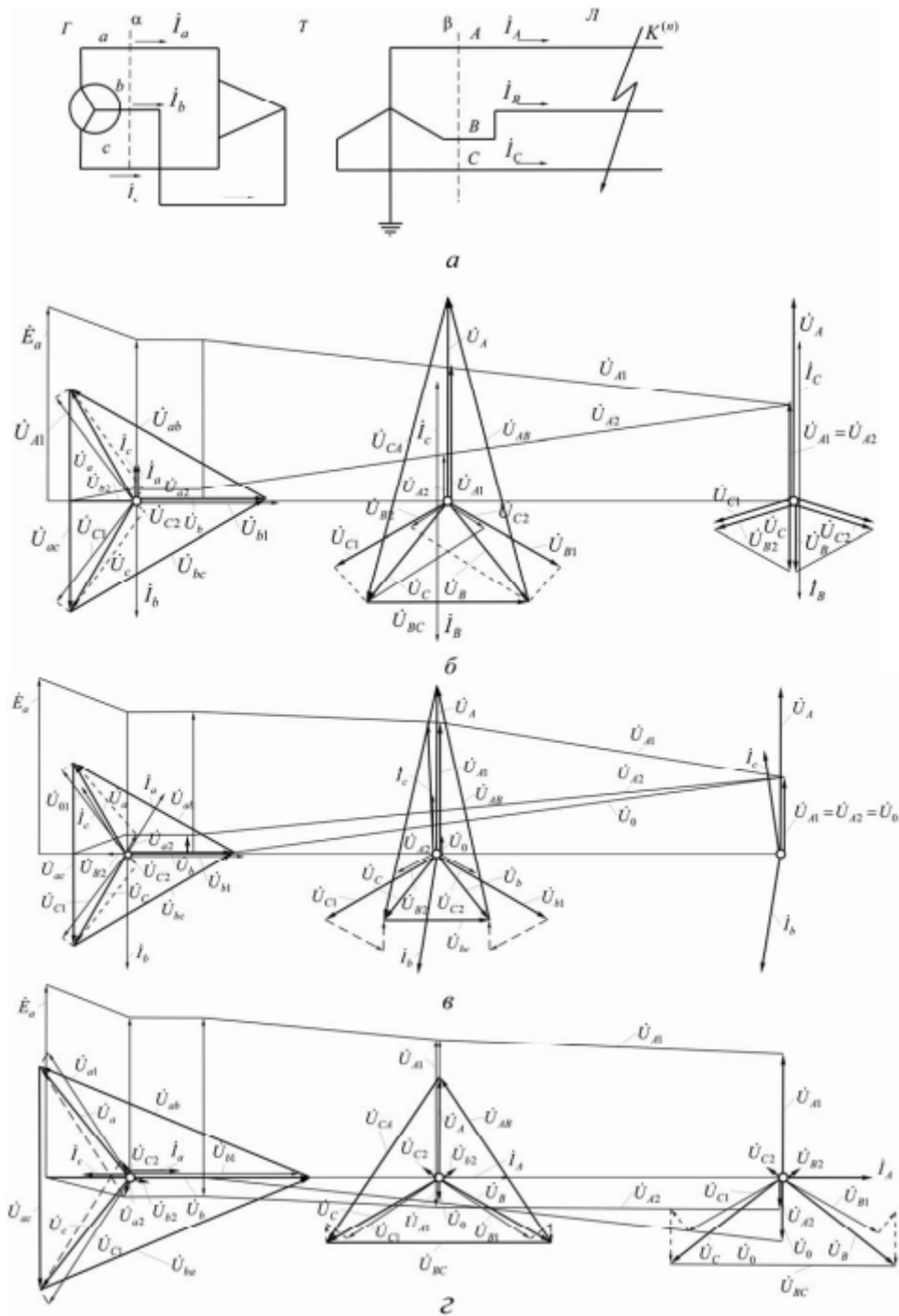


Рис. 10. Векторні діаграми у різних точках СЕП (а) – розрахункова схема фазних напруг і струмів та їх складових при несиметричному короткому замиканні: двофазному (б), двофазному на землю (в), однофазному (г)

У разі побудови векторних діаграм напруг для інших ділянок мережі слід зважити на три обставини:

1) напруга прямої послідовності має найменше значення у місці КЗ й зростає при наближенні до джерела, а у напруг зворотної та нульової послідовностей, навпаки, – найбільші за модулем значення у місці КЗ, які при наближенні до джерела зменшуються;

2) при проходженні через трансформатор системи векторів прямої та зворотної послідовностей повертаються відповідно за ходом та проти ходу



годинникової стрілки відносно їх положення у місці КЗ, причому кут повороту залежить від групи з'єднання обмоток трансформатора;

3) обмотки трансформаторів, з'єднані на трикутник, обмежують проходження струмів нульової послідовності у мережі; у комплексних схемах заміщення обмотки вважаються початком схеми заміщення нульової послідовності.

## 5. Методи розрахунку несиметричних коротких замикань

Методи розрахунку характеристик перехідного процесу при трифазному КЗ за правилом еквівалентності для струму прямої послідовності можуть бути застосовані для розрахунку перехідного процесу за будь-якого несиметричного КЗ. Періодичну складову струму прямої послідовності несиметричного КЗ визначають так само, як і періодичну складову струму трифазного КЗ, але тільки у точці, віддаленій від дійсної точки КЗ на додатковий опір  $Z_{\Delta}^{(n)}$ . Під час розрахунку цього струму можна скористатися комплексною схемою заміщення. Струми зворотної та нульової послідовностей, а також напруги окремих послідовностей у точці КЗ визначаємо за струмом прямої послідовності (табл. 1).

Ознайомимося з особливостями розрахунку параметрів режиму за несиметричного КЗ й наведемо відповідні алгоритми.

Розрахунок початкових значень періодичних складових параметрів режиму. Схеми заміщення загалом складають для всіх послідовностей: прямої, зворотної та нульової. Параметри схеми заміщення прямої послідовності визначають для моменту часу  $t=0$ , для чого всі генератори, компенсатори та навантаження еквівалентують їх надперехідними опорами та е.р.с. Напруга прямої послідовності у будь-якій точці СЕП при несиметричному КЗ завжди нижча, аніж при трифазному КЗ у тій же точці, а тому підживлення від окремих двигунів за несиметричного КЗ виявляє себе слабше у порівнянні з трифазним КЗ. До приблизної оцінки ударного струму несиметричного КЗ часто не враховують впливу навантаження та окремих двигунів за винятком потужних, безпосередньо пов'язаних з точкою КЗ.

У наближених розрахунках схему заміщення для зворотної послідовності отримують з такої ж схеми для прямої послідовності, вилучивши е.р.с. та взявши  $Z_{2рез} \equiv Z_{1рез}$ .

Послідовність щодо обліку початкових значень періодичних складових параметрів режиму:

- складають схеми заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовностей, визначаючи параметри еквівалентів елементів (опорів) та е.р.с. джерел;

- перетворенням схем заміщення для окремих послідовностей відносно точки КЗ знаходять результуючі опори  $Z_{1рез}, Z_{2рез}, Z_{0рез}$ ;
- за формулою (1) обчислюють струм прямої послідовності;
- залежно від виду КЗ за наведеними у табл. 1 формулами визначають у місці КЗ струми зворотної та нульової послідовностей, напруги окремих послідовностей;
- обчислюють розподіл струмів окремих послідовностей у відповідних первинних розрахункових схемах та у разі необхідності враховують зміщення векторів струмів прямої і зворотної послідовностей на відповідні кути при їх трансформації;
- за виразами табл. 1 знаходять фазні струми та напруги для зазначених видів несиметричного КЗ.

Розрахунок параметрів режиму при несиметричному КЗ для  $t > 0$  за типовими кривими генераторів. Типові криві можуть бути використані для встановлення значення періодичної складової струму прямої послідовності, а, отже, і повного струму у довільний момент часу перехідного процесу при несиметричному КЗ.

Якщо розрахункова схема містить лише одне еквівалентне джерело (синхронний генератор, компенсатор або групу генераторів, що мають однакові параметри та перебувають в однакових умовах відносно точки КЗ), то алгоритм розрахунку подібний до розрахунку трифазного КЗ:

- знаходять струм прямої послідовності генератора  $I_{1Г}^{(n)}$ ;
- визначають електричну віддаленість точки еквівалентного трифазного КЗ від генератора

$$I_{*1Г}^{(n)} = I_{1Г}^{(n)} / I_{Гн}, \quad (43)$$

де  $I_{Гн}$  – номінальний струм генератора, зведений до ступеня напруги мережі, де сталося КЗ;

- за знайденим значенням (43) вибирають відповідну типову криву і для потрібного моменту часу  $t$  визначають відношення

$$\gamma_t^{(n)} = (I_{1Гt}^{(n)} / I_{1Г}^{(n)}); \quad (44)$$

- за відношенням  $\gamma_t^{(n)}$  обчислюють шукане значення періодичної складової струму несиметричного КЗ у момент часу  $t$ :

$$I_{Гt}^{(n)} = m^{(n)} \gamma_t^{(n)} I_{1Г}^{(n)}. \quad (45)$$

Якщо СЕП має декілька джерел, то їх доцільно розбити на дві групи. До першої слід занести джерела, електрично близько розташовані від місця КЗ (джерела обмеженої потужності), а до другої – електрично віддалені джерела чи такі, що характеризуються незмінною напругою на затискачах (джерела необмеженої потужності). Здебільшого, точка КЗ може виявитися за опором  $x_{\kappa}$ , загальним для всіх груп джерел. Коли навіть у схемі заміщення для прямої послідовності  $x_{\kappa,1} = 0$ , то в комплексній схемі заміщення як  $x_{\kappa,1}$  буде опір  $x_{\Delta}^{(n)}$ .

Для знаходження значень параметрів режимів за несиметричних КЗ використовують такий алгоритм:

- 1) визначають струм прямої послідовності у місці КЗ  $I_{\kappa A1\Sigma}^{(n)}$ ;
- 2) відшукують струм прямої послідовності від кожного джерела у момент часу  $t = 0$ ;
- 3) оцінюють електричну віддаленість джерел від точки КЗ за відношенням  $I_{\Gamma i}''/I_{\Gamma ni}$ ;
- 4) індивідуально введені до розрахункової схеми джерела розбивають за електричною віддаленістю  $I_{\Gamma i}''/I_{\Gamma ni} \leq 2$  та  $I_{\Gamma j}''/I_{\Gamma nj} > 2$  на дві групи;
- 5) комплексній схемі заміщення шляхом перетворень надають вигляду трипроменевої зірки, де у вітку з точкою  $K_l^{(n)}$  увімкнений опір  $x\Delta^{(n)}$ ;
- 6) визначають сумарний струм прямої послідовності  $I_{\Gamma\Sigma}^{(n)}$  віток  $I_{\Gamma j}''/I_{\Gamma nj} > 2$ ;
- 7) виявляють відношення  $I_{\Gamma\Sigma}^{(n)}/I_{\kappa A1\Sigma}^{(n)}$ ;
- 8) для моменту часу  $t$  та електричної віддаленості  $I_{\Gamma\Sigma}^{(n)}/\sum_{j=1} I_{\Gamma nj}''$

спершу обчислюють відношення  $I_{\Gamma i} / I_{\Gamma i}''$ , а потім, використовуючи допоміжну типову криву  $(I_{\Gamma i} / I_{\Gamma i}'') = f_2(I_{\Gamma i} / I_{\Gamma i}'')$  відповідно до отриманого у п.7 співвідношення, визначають

$$\gamma_i^{(n)} = I_{\Gamma i} / I_{\Gamma i}''; \quad (46)$$

9) знаходять шукане діюче значення періодичної складової струму у місці несиметричного КЗ для моменту часу  $t$ :

$$I_{\Pi t}^{(n)} = m^{(n)} \gamma_i^{(n)} I_{\kappa A1\Sigma}^{(n)}. \quad (47)$$

Розрахунок струму при несиметричних КЗ для  $t = 0$  за розрахунковими кривими генераторів. Послідовність при обчисленні з використанням розрахункових кривих:

1) складають схеми заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовностей;

2) перетворюють схеми заміщення окремих послідовностей до  $x_{1\text{рез}}, x_{2\text{рез}}, x_{0\text{рез}}$  відносно точки КЗ; обчислюють результуючий опір комплексної схеми заміщення для даного виду несиметричного КЗ:

$$x_{\text{рез}}^{(n)} = x_{1\text{рез}} + x_{\Delta}^{(n)}; \quad (48)$$

3) знаходять розрахунковий опір живильних віток (загалом їх може бути  $j = N - 1, \dots$ ):

– для генераторної  $j$ -ї вітки

$$x_{*n\text{роз}j}^{(n)} = x_{\text{рез}}^{(n)} S_{nj} / (C_j U_{\delta}^2) \quad (49)$$

або

$$x_{*n\text{роз}j}^{(n)} = x_{\delta\text{рез}}^{(n)} S_{nj} / (C_j S_{\delta}), \quad (50)$$

де  $S_{nj}$  – номінальна потужність генератора  $j$ -ї вітки;  $C_j$  – коефіцієнт струморозподілу для  $j$ -ї вітки, що визначається у схемі прямої послідовності (у разі розрахунку за загальною зміною  $C=1$ , а під  $S_{nj}$  слід розуміти сумарну номінальну потужність усіх генераторів схеми);

– для вітки з джерелом необмеженої потужності опір буде

$$x_{*GS} = (x_{*1pez} + x_{*A}^{(n)}) / C_{GS}, \quad (51)$$

де  $C_{GS}$  – коефіцієнт струморозподілу для вітки зв'язку з джерелом необмеженої потужності (якщо таке джерело зв'язане з точкою КЗ кількома вітками, то під  $C_{GS}$  треба розуміти суму відповідних коефіцієнтів струморозподілу);

4) для джерела обмеженої потужності (з  $x_{*n\,роз} < 3$ ) на розрахункових кривих за значенням розрахункового опору  $j$ -ї вітки для заданого моменту часу  $t$  відшукують відносне значення струму прямої послідовності  $I_{*Altj}^{(n)}$ ; струм прямої послідовності обчислюють в іменованих одиницях виміру:

$$I_{*Altj}^{(n)} = I_{*nAltj}^{(n)} I_{nj}; \quad (52)$$

5) при електричній віддаленості точки КЗ від джерел, а  $x_{*розj}^{(n)} \geq 3$  можна взяти

$$I_{*Altj}^{(n)} = I_{nj} / x_{*n\,розj}^{(n)} \quad (53)$$

або

$$I_{*AltGS} = I_{\delta} / x_{\delta GS}, \quad (54)$$

якщо опір  $x_{\delta GS}$  джерела виражений у відносних одиницях виміру чи за формулою

$$I_{*AltGS} = U_{\delta} / (\sqrt{3} x_{GS}), \quad (55)$$

коли опір  $x_{GS}$  заданий в іменованих одиницях виміру;

б) діюче значення періодичної складової струму у місці несиметричного КЗ для моменту часу  $t$

$$I_{\Pi t}^{(n)} = I_{\kappa t}^{(n)} = m^{(n)} \left( \sum_{j=1}^N I_{*Altj}^{(n)} + I_{*AltGS} \right). \quad (56)$$

Розрахунок струму при несиметричному КЗ методом спрямлених характеристик розпочинають із складання схем заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовностей. У схемі заміщення для прямої послідовності синхронні генератори з АРЗ задають індуктивним опором  $x_t$  та е.р.с.  $E_t$  (напругою генератора), обчисленими для моменту часу  $t$ . Режим роботи генератора з АРЗ, що працює ізольовано на зовнішню мережу, визначають порівнянням зовнішнього відносно затискачів генератора опору комплексної схеми заміщення з відповідним критичним опором для моменту часу  $t$ . Для СЕП з кількома джерелами живлення режим роботи їх генераторів з АРЗ вибираємо орієнтовно з наступною перевіркою. Вибраний режим можна перевірити, порівнявши струм прямої послідовності генератора з його критичним струмом або залишкову напругу прямої послідовності на затискачах генератора – з номінальною напругою (для режиму підйому збудження дотриматись умови  $I_{1\Gamma t} \geq I_{\kappa t}$  або  $U_{1\Gamma t} < U_n$ , а для режиму нормальної напруги –  $I_{1\Gamma t} \leq I_{\kappa t}$  чи  $U_{1\Gamma t} = U_n$ ).

Систему як джерело необмеженої потужності вводять до схеми заміщення прямої послідовності відповідною сталою е.р.с. та опором, що

дорівнює нулю. Навантаження слід вводити до схеми заміщення у точках їх дійсного приєднання з  $x_{Inng}^* = 1,2$  та  $E_n = 0$ .

Опір елементів у схемах заміщення для зворотної та нульової послідовностей не залежить від часу й дорівнюють як і при  $t=0$ .

Алгоритм розрахунку струму несиметричного КЗ методом спрямлених характеристик:

1) обирають режим роботи синхронних генераторів з АРЗ та визначають їх відповідні параметри;

2) складають схеми заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовностей, розраховуючи параметри еквівалентів елементів цих схем;

3) перетворюють схеми заміщення окремих послідовностей відносно точки КЗ, знаходячи результуючі опір та е.р.с.;

4) струм прямої послідовності в точці КЗ розраховують за формулою (1);

5) визначають струми(порівнюють з відповідними критичними), які перебігають з віток синхронних генераторів із АРЗ;

б) перевіряють правильність вибору режимів: якщо режими генераторів з АРЗ взяті такими, що відповідають нормі, переходять до наступного етапу розрахунку. Коли ж режим хоча б для одного з генераторів вибраний неправильно, розраховують повторно, обираючи для цього генератора інший режим (повертаються до 1-го етапу розрахунку). При цьому для даного генератора беруть е.р.с. рівній номінальній напрузі генератора, а опір – нулю. До того ж змінюється лише схема заміщення для прямої послідовності. Схеми заміщення зворотної та нульової послідовностей і відповідні їм результуючі опори залишаються без змін;

7) наступні етапи розрахунку збігаються з розрахунком початкового значення періодичної складової струму несиметричного КЗ, розпочинаючи з етапу 4.