Національний авіаційний університет

Аерокосмічний факультет

Кафедра комп’ютеризованих електротехнічних систем та технологій

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 10

ПОПЕРЕЧНА НЕСИМЕТРІЯ

1. Початкові положення

Під час розрахунку одноразової поперечної несиметрії за методом симетричних складових співвідношення між симетричними складовими струмів та напруг окремих послідовностей для особливої фази *A* можуть бути подані системою рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{к\ A1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - \underline{Z}_{1\,рез}\dot{I}_{к\ A1} \\ \dot{U}_{к\ A2} &= 0 - \underline{Z}_{2\,рез}\dot{I}_{к\ A2} \\ \dot{U}_{к\ A0} &= 0 - \underline{Z}_{0\,рез}\dot{I}_{к\ A0} \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

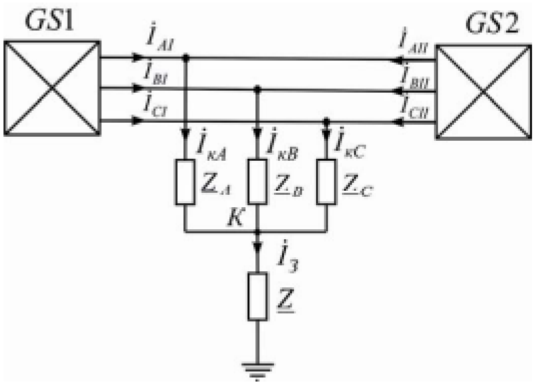

Рис. 1. Розрахункова схема одноразової поперечної несиметрії в трифазній системі напруг

Система (1) містить шість невідомих $I_{кA1}$; $I_{кA2}$; $I_{кA0}$; $U_{кA1}$; $U_{кA2}$; $U_{кA0}$. Для їх визначення необхідно додатково с $\vec{U}_к = \underline{Z}\vec{I}_к$, три рівняння на основі граничних умов, що характеризують конкретний вид несиметрії. Розрахункова схема зазначеної вище несиметрії у довільному місці трифазної електричної мережі загалом зображується як приєднання у цьому місці відгалуження з неоднакових опорів у фазах (рис. 1). Коли фази *A*, *B* та *C* замикаються між собою опорами

$\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_C$ та на землю через загальний опір $\underline{z}$, то з такої моделі можна отримати несиметричне коротке замикання будь-якого виду, вважаючи значення частини опорів рівними нулю або нескінченними. Коротке замикання міститься на відгалуженні. Струми та напруги на відгалуженні – це струми та напруги у місці КЗ, сполучені між собою матричним рівнянням, що описує граничні умови

(2)

де $U\kappa = |\ U_A\ U_B\quad U_C|^T$; $I_\kappa = |I_A\ \ I_B\ I_C\,|^T$ – вектори-стовпці напруг та струмів у місці КЗ; $\underline{Z}$ – матриця опорів:

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_A + \underline{Z} & \underline{Z} & \underline{Z} \\ \underline{Z} & \underline{Z}_B + \underline{Z} & \underline{Z} \\ \underline{Z} & \underline{Z} & \underline{Z}_C + \underline{Z} \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Граничні умови (2) можна записати у симетричних складових

$$S\vec{U}_{\kappa\,S} = S\underline{Z}\vec{I}_{\kappa\,S}, \tag{4}$$

перетворивши $\vec{U}_{\kappa\,S} = S^{-1}\underline{Z}S\vec{I}_{\kappa\,S} = \underline{Z}_S\vec{I}_{\kappa\,S}$,

де $\underline{Z}_S = S^{-1}\underline{Z}S$.

З рівняння (1) разом з одержаною системою рівнянь (4) визначимо струми та напруги окремих послідовностей у місці КЗ. Такий підхід дає змогу отримати розв'язок у загальному вигляді, з якого потім стають логічним наслідком розв'язки для всіх окремих випадків, проте це призводить до вельми громіздких виразів. Тому значно простіше й наочніше здійснювати розв'язок для кожної поперечної несиметрії, використовуючи граничні умови, що характеризують саме цей вид несиметрії.

Розглянемо основні види несиметричних коротких замикань: однофазне, двофазне та двофазне на землю. Вважаємо:

– в усіх випадках відбувається "металеве" коротке замикання (врахування перехідних опорів (дуга тощо) викликає додаткові ускладнення: на рис. 1 опір $\underline{Z}$ дорівнює нулю);

– схеми заміщення для окремих послідовностей еквівалентні відносно місця короткого замикання (визначені результуючі е.р.с. $E_{A\Sigma}$ та опори $\underline{Z}_{1рез}$, $\underline{Z}_{2рез}$, $\underline{Z}_{0рез}$);

– під час запису граничних умов фаза $_A$ – особлива;

– за позитивний обрано напрямок струмів до місця КЗ (фазних струмів і симетричних складових);

– для спрощення запису індекс виду КЗ збережений лише в граничних умовах та остаточних результатах. Фазні напруги та струми через симетричні складові особливої фази знаходять за виразами:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa\,A} &= \dot{U}_{\kappa\,A1} + \dot{U}_{\kappa\,A2} + \dot{U}_{\kappa\,A0} \\ \dot{U}_{\kappa\,B} &= a^2\dot{U}_{\kappa\,A1} + a\dot{U}_{\kappa\,A2} + \dot{U}_{\kappa\,A0} \\ \dot{U}_{\kappa\,C} &= a\dot{U}_{\kappa\,A1} + a^2\dot{U}_{\kappa\,A2} + \dot{U}_{\kappa\,A0} \end{aligned}\right\}; \tag{5}$$

$$
\left.\begin{aligned}
\dot I_{к\,A} &= \dot I_{к\,A1} + \dot I_{к\,A2} + \dot I_{к\,A0}\\
\dot I_{к\,B} &= a^2 \dot I_{к\,A2} + a\dot I_{к\,A2} + \dot I_{к\,A0}\\
\dot I_{к\,C} &= a\dot I_{к\,A1} + a^2 \dot I_{к\,A2} + \dot I_{к\,A0}
\end{aligned}\right\}, \tag{6}
$$

де для фаз *B* та *C* симетричні складові струмів і напруг визначені за допомогою оператора повороту a .

2. Однофазне коротке замикання

Граничним умовам при однофазному КЗ відповідає розрахункова схема рис. 2,а, яка утворюється за умови, коли значення опорів: $\underline{Z}_A$ рівне нулю, а $\underline{Z}_B$і $\underline{Z}_C$ – нескінченності (рис. 1). З використанням фазних напруг і струмів граничні умови запишемо як

$$
\left.\begin{aligned}
\dot I^{(1)}_{к\,A} &= 0\\
\dot I^{(1)}_{к\,B} &= 0\\
\dot I^{(1)}_{к\,C} &= 0
\end{aligned}\right\}. \tag{7}
$$

Перетворимо (7) через симетричні складові особливої фази *A* за рівняннями (5) та (6):

$$
\left.\begin{aligned}
\dot U_{к\,A} &= \dot U_{к\,A1} + \dot U_{к\,A2} + \dot U_{к\,A0} = 0\\
\dot I_{к\,B} &= a^2 \dot I_{к\,A1} + a\dot I_{кA2} + \dot I_{к\,A0} = 0\\
\dot I_{к\,C} &= a\dot I_{к\,A1} + a^2 \dot I_{к\,A2} + \dot I_{A0} = 0
\end{aligned}\right\}. \tag{8}
$$

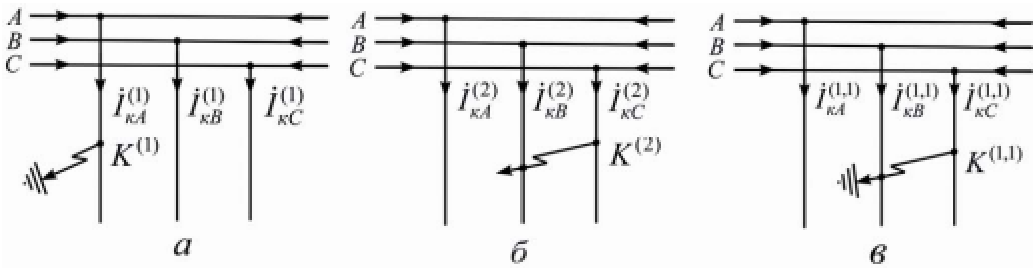

Рис. 2. . Розрахункові схеми несиметричного КЗ: а – однофазного; б – двофазного; в – двофазного на землю

Розв'язуючи рівняння (1) разом з отриманими рівняннями (8), визначимо струми та напруги окремих послідовностей. Підставимо $U_{к\,A1}$, $U_{к\,A2}, U_{к\,A0}$ з (1) у рівняння (8) для $U_{кA}$ і матимемо систему з трьох рівнянь відносно струмів окремих послідовностей:

$$
\left.\begin{aligned}
&\underline{Z}_{1рез}\dot I_{к\,A1} + \underline{Z}_{2рез}\dot I_{к\,A2} + \underline{Z}_{0рез}\dot I_{к\,A0} = \dot E_{A\Sigma}\\
&a^2 \dot I_{к\,A1} + a\dot I_{к\,A2} + \dot I_{к\,A0} = 0\\
&a\dot I_{к\,A1} + a^2 \dot I_{к\,A2} + \dot I_{кA0} = 0
\end{aligned}\right\}. \tag{9}
$$

За формулами Крамера струми послідовностей:

$$\dot{I}_{\kappa A1} = \Delta_1 / \Delta;\ \dot{I}_{\kappa A2} = \Delta_2 / \Delta;\ \dot{I}_{\kappa A0} = \Delta_0 / \Delta.$$

Тут Δ – визначник системи рівнянь (9)

$$\Delta = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{1рез} & \underline{Z}_{2рез} & \underline{Z}_{0рез} \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix} = (a - a^2)(\underline{Z}_{1рез} + \underline{Z}_{2рез} + \underline{Z}_{0рез});$$

Δ_1, Δ_2, Δ_0 – додаткові визначники, які отримуємо заміною і-го стовпця визначника стовпцем вільних членів системи

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_0 = E_{A\Sigma}(a - a^2).$$

Тоді

$$\dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} = \dot{I}^{(1)}_{\kappa A2} = \dot{I}^{(1)}_{\kappa A0} = \dot{E}_{A\Sigma} \Big/ \left(\underline{Z}_{1рез} + \underline{Z}_{2рез} + \underline{Z}_{0рез} \right). \tag{10}$$

Симетричні складові напруг особливої фази А у місці КЗ знаходимо за (1):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}^{(1)}_{\kappa A1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - \underline{Z}_{1рез} \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} = \left(\underline{Z}_{2рез} + \underline{Z}_{0рез} \right) \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa A2} &= -\underline{Z}_{2рез} \dot{I}^{(1)}_{\kappa A2} \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa A0} &= -\underline{Z}_{0рез} \dot{I}^{(1)}_{\kappa A0} \end{aligned} \right\}. \tag{11}$$

Струми та напруги фаз у місці КЗ можна розрахувати аналітично, використавши рівняння (5) та (6),

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}^{(1)}_{\kappa A} &= 3\dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} \\ \dot{I}^{(1)}_{\kappa B} &= 0 \\ \dot{I}^{(1)}_{\kappa C} &= 0 \end{aligned} \right\}; \tag{12}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}^{(1)}_{\kappa A} &= 0 \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa B} &= \left[(a^2 - a)\underline{Z}_{2рез} + (a^2 - 1)\underline{Z}_{0рез} \right] \cdot \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa C} &= \left[(a - a^2)\underline{Z}_{2рез} + (1 - a^2)\underline{Z}_{0рез} \right] \cdot \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

Коефіцієнт пропорційності, що сполучає струми фазний та прямої послідовності (для особливої фази *А*)

$$m^{(1)} = \dot{I}^{(1)}_{\kappa A} \Big/ \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} = 3. \tag{14}$$

Фазні струми та напруги після розрахунку симетричних складових особливої фази *А* можна також знайти графічно, побудувавши у масштабі відповідні векторні діаграми (при побудові індекс “*к*” в усіх векторах випускаємо). Побудуємо векторну діаграму струмів. Нехай

$$\dot{U}_{A\Sigma} = jU_{A\Sigma}; \qquad \underline{Z}_{1рез} = jx_{1рез};$$

$$\underline{Z}_{2рез} = jx_{2рез}; \qquad \underline{Z}_{0рез} = jx_{0рез}.$$

Тоді $I_{\kappa A1} = I_{\kappa A1}$, а $U_{\kappa A1} = jU_{\kappa A1}$. По осі дійсних чисел комплексної площини відкладаємо три паралельні однакові вектори $I_{\kappa A1}$, $I_{\kappa A2}$, $I_{\kappa A0}$. Підсумовуючи пофазно вектори окремих послідовностей отримуємо векторну діаграму фазних струмів (рис. 3,а). Аналогічно побудуємо векторну діаграму напруг (рис. 3,б). Кут θ_U між напругами непошкоджених фаз залежить від співвідношення $x_{2\,рез}$ та $x_{0\,рез}$ й може змінюватися у межах $\pi/3 \leq \theta_U \leq \pi$. Якщо $x_{0\,рез} = \infty$, то кут $\theta_U \rightarrow 180°$, а при $x_{0\,рез}$ кут $\theta_U \rightarrow 60°$.

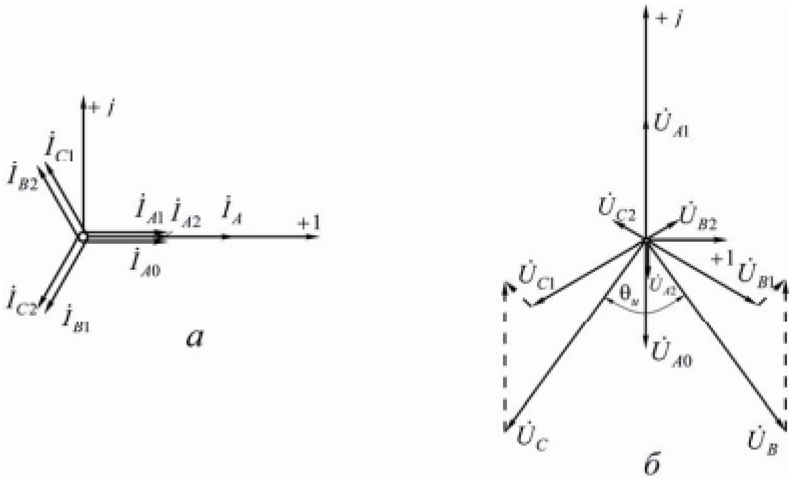

Рис. 3. Векторні діаграми фазних струмів (а) і напруг (б) та їх симетричних складових у місці однофазного КЗ

При однофазних КЗ на землю слід розрізняти напругу фази стосовно землі (фазна напруга) та напругу нульової точки системи векторів. Ці дві напруги різняться на складову напруги нульової послідовності. Якщо напруга нульової послідовності відсутня, то фазна напруга щодо нульової точки системи векторів – відносно землі також.

3. Двофазне коротке замикання

Розрахункову схему двофазного короткого замикання $K^{(2)}$ (рис.2,б) отримаємо при значеннях опорів: $\underline{Z}_A$ – нескінченності, а $\underline{Z}_B$ та $\underline{Z}_C$ – нулю (рис. 1). Граничні умови у фазних величинах:

$$\left.\begin{array}{l} \dot{I}^{(2)}_{кA} = 0 \\ \dot{I}^{(2)}_{кB} = -\dot{I}^{(2)}_{кC} \\ \dot{U}^{(2)}_{кB} = \dot{U}_{кC} \end{array}\right\}. \tag{15}$$

Перетворимо граничні умови через симетричні складові особливої фази A за рівняннями (5) та (6):

$$\left.\begin{array}{l} \dot{I}_{кA} = \dot{I}_{кA1} + \dot{I}_{кA2} + \dot{I}_{кA0} = 0 \\ \dot{I}_{кB} + \dot{I}_{кC} = (a^2 + a)\dot{I}_{кA1} + (a + a^2)\dot{I}_{кA2} + 2\dot{I}_{кA0} = 0 \\ \dot{U}_{кB} - \dot{U}_{кC} = (a^2 - a)\dot{U}_{кA1} + (a - a^2)\dot{U}_{кA2} = 0 \end{array}\right\}. \tag{16}$$

Розв'язуючи разом системи рівнянь (1) та (16), знайдемо струми і напруги окремих послідовностей особливої фази А у місці КЗ. Для чого підставимо у рівняння (16) вирази $U_{к\,A1}$ та $U_{к\,A2}$ з рівнянь (1)

$$\left.\begin{array}{l} \dot{I}_{кA1} + \dot{I}_{кA2} + \dot{I}_{кA0} = 0 \\ (a^2 + a)\dot{I}_{кA1} + (a + a^2)\dot{I}_{кA2} + 2\dot{I}_{кA0} = 0 \\ (a^2 - a)\underline{Z}_{1рез}\dot{I}_{кA1} + (a - a^2)\underline{Z}_{2рез}\dot{I}_{кA2} = (a^2 - a)\dot{E}_{A\Sigma} \end{array}\right\}. \tag{17}$$

Розв'язання системи (17) відносно струмів:

$$\dot{I}_{кA1} = \Delta_1/\Delta;\ \dot{I}_{кA2} = \Delta_2/\Delta;\ \dot{I}_{кA0} = \Delta_0/\Delta,$$

де $\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 + a & a + a^2 & 2 \\ (a^2 - a)\underline{Z}_{1рез} & (a - a^2)\underline{Z}_{2рез} & 0 \end{vmatrix} = 3(a^2 - a)(\underline{Z}_{1рез} + \underline{Z}_{2рез});$

$$\Delta_1 = 3(a^2 - a)E_{A\Sigma};\ \ \Delta_2 = -\Delta_1;\ \ \Delta_0 = 0.$$

Тоді маємо:

$$\left.\begin{array}{l} \dot{I}^{(2)}_{кA1} = \dot{E}_{A\Sigma}/(\underline{Z}_{1рез} + \underline{Z}_{2рез}) \\ \dot{I}^{(2)}_{кA2} = -\dot{I}^{(2)}_{кA1} = -\dot{E}_{A\Sigma}/(\underline{Z}_{1рез} + \underline{Z}_{2рез}) \\ \dot{I}^{(2)}_{кA0} = 0 \end{array}\right\}. \tag{18}$$

Напруги окремих послідовностей для особливої фази *А* у місці КЗ визначаємо за рівняннями (1):

$$\left.\begin{array}{l} \dot{U}^{(2)}_{кA1} = \underline{Z}_{1рез}\dot{I}^{(2)}_{кA1} \\ \dot{U}^{(2)}_{кA2} = -\underline{Z}_{2рез}\dot{I}^{(2)}_{кA2} = \underline{Z}_{2рез}\dot{I}^{(2)}_{кA1} = \dot{U}^{(2)}_{кA1} \\ \dot{U}^{(2)}_{кA0} = 0 \end{array}\right\}. \tag{19}$$

Під час визначення напруги $U^{(2)}_{кA0}$ слід ураховувати, що у системах із заземленою нейтраллю ($x_{0\,рез}$ має кінцеве значення) напруга $U^{(2)}_{кA0}$ при $I^{(2)}_{кA0}=0$ на основі (1) рівна нулю, а в системах з ізольованою нейтраллю ($\underline{Z}_{0\,рез}=\infty$) напруга $U^{(2)}_{кA0}$ та одне з рівнянь напруг вилучається.

Струми та напруги фаз з урахуванням (5), (6) і (15):

$$\left.\begin{array}{l} \dot{I}^{(2)}_{кA} = 0 \\ \dot{I}^{(2)}_{кB} = a^2\dot{I}^{(2)}_{кA1} + a\dot{I}^{(2)}_{кA2} = (a^2 - a)\dot{I}^{(2)}_{кA1} = -j\sqrt{3}\dot{I}^{(2)}_{кA1} \\ \dot{I}^{(2)}_{кC} = a\dot{I}^{(2)}_{кA1} + a^2\dot{I}^{(2)}_{кA2} = (a - a^2)\dot{I}^{(2)}_{кA1} = j\sqrt{3}\dot{I}^{(2)}_{кA1} = -\dot{I}^{(2)}_{кB} \end{array}\right\}; \tag{20}$$

$$\left.\begin{array}{l} \dot{U}^{(2)}_{кA} = \dot{U}^{(2)}_{кA1} + \dot{U}^{(2)}_{кA2} = 2\dot{U}^{(2)}_{кA1} = 2\underline{Z}_{2рез}\dot{I}^{(2)}_{кA1} \\ \dot{U}^{(2)}_{кB} = a^2\dot{U}^{(2)}_{кA1} + a\dot{U}^{(2)}_{кA2} = -\dot{U}^{(2)}_{кA1} \\ \dot{U}^{(2)}_{кC} = a\dot{U}^{(2)}_{кA1} + a^2\dot{U}^{(2)}_{кA2} = -\dot{U}^{(2)}_{кA1} = \dot{U}^{(2)}_{кB1} \end{array}\right\}. \tag{21}$$

Коефіцієнт пропорційності між струмами пошкодженої фази та прямої послідовності особливої фази A у місці КЗ

$$m^{(2)} = \left| I^{(2)}_{кB} \big/ I^{(2)}_{кA1} \right| = \sqrt{3}. \qquad (22)$$

Векторні діаграми напруг і струмів у місці двофазного КЗ наведено на рис. 4. Вони побудовані за умови, що електричний ланцюг еквівалентний індуктивним опорам, а е.р.с. $E_{A\Sigma}$ спрямована віссю уявних чисел.

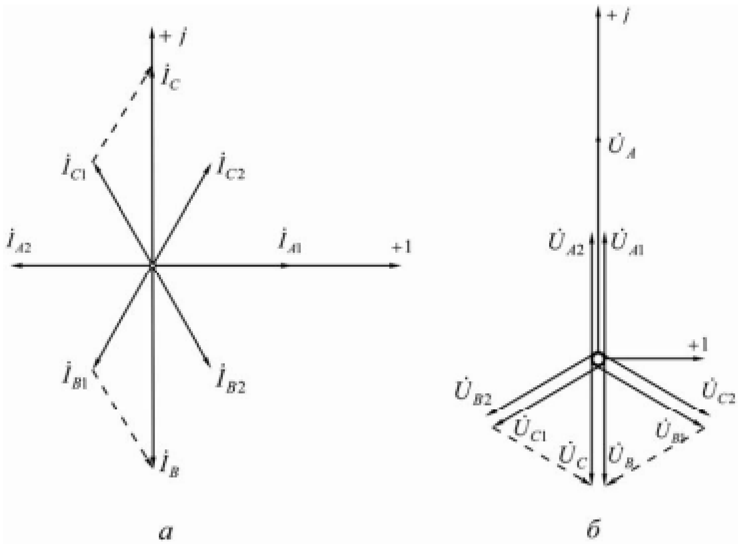

Рис. 4. Векторні діаграми фазних струмів (а) і напруг (б) та їх симетричних складових у місці двофазного КЗ

4. Двофазне коротке замикання

Розрахункову схему двофазного короткого замикання на землю (рис.2,в) отримуємо при значеннях опорів, які дорівнюють: $\underline{Z}_A$ – нескінченності, а $\underline{Z}_B$ та $\underline{Z}_C$ – нулю (рис. 1). Схемі відповідають граничні умови у фазних величинах:

$$\left.\begin{aligned} &\dot I^{(1,1)}_{кA} = 0 \\ &\dot U^{(1,1)}_{кB} = \dot U^{(1,1)}_{кC} = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (23)$$

Виразимо їх симетричними складовими особливої фази A:

$$\left.\begin{aligned} &\dot I_{к\,A} = \dot I_{к\,A1} + \dot I_{к\,A2} + \dot I_{к\,A0} = 0 \\ &\dot U_{к\,B} = a^2\dot U_{к\,A1} + a\dot U_{к\,A2} + \dot U_{к\,A0} = 0 \\ &\dot U_{к\,C} = a\dot U_{к\,A1} + a^2\dot U_{к\,A2} + \dot U_{к\,A0} = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (24)$$

З рівнянь (1) визначимо $I_{кA1}$, $I_{кA2}$, $I_{кA0}$ та підставимо їх у (24)

$$\left.\begin{aligned} &\dot U_{кA1}\big/\underline{Z}_{1рез} + \dot U_{кA2}\big/\underline{Z}_{2рез} + \dot U_{кA0}\big/\underline{Z}_{0рез} = \dot E_{A\Sigma}\big/\underline{Z}_{1рез} \\ &a^2\dot U_{кA1} + a\dot U_{кA2} + \dot U_{кA0} = 0 \\ &a\dot U_{кA1} + a^2\dot U_{кA2} + \dot U_{кA0} = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (25)$$

Розв’яжемо систему рівнянь (25) відносно напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \Delta_1/\Delta;\ \dot{U}_{\kappa A2} = \Delta_2/\Delta;\ \dot{U}_{\kappa A0} = \Delta_0/\Delta,$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1/\underline{Z}_{1\,рез} & 1/\underline{Z}_{2\,рез} & 1/\underline{Z}_{0\,рез} \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix} = (a-a^2)\left(\frac{1}{\underline{Z}_{1\,рез}} + \frac{1}{\underline{Z}_{2\,рез}} + \frac{1}{\underline{Z}_{0\,рез}}\right);$$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_0 = (a-a^2)\dot{E}_{A\Sigma}/\underline{Z}_{1\,рез}.$$

Тоді

$$\dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A1} = \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A2} = \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A0} = \dot{E}_{A\Sigma}\frac{1/\underline{Z}_{1\,рез}}{1/\underline{Z}_{1\,рез} + 1/\underline{Z}_{2\,рез} + 1/\underline{Z}_{0\,рез}}. \qquad (26)$$

Підставивши (26) у (1), визначимо струми прямої, зворотної та нульової послідовностей у місці КЗ:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1} &= \dot{E}_{A\Sigma}/\left[\underline{Z}_{1\,рез} + \underline{Z}_{2\,рез}\underline{Z}_{0\,рез}/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right)\right] \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A2} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\,\underline{Z}_{0\,рез}/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right) \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A0} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\,\underline{Z}_{2\,рез}/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (27)$$

Використавши рівняння (6) та (5), обчислимо струми і напруги фаз:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A} &= 0 \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa B} &= \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\left[a^2 - \left(\underline{Z}_{2\,рез} + a\underline{Z}_{0\,рез}\right)/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right)\right] \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa C} &= \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\left[a - \left(\underline{Z}_{2\,рез} + a^2\underline{Z}_{0\,рез}\right)/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right)\right] \end{aligned}\right\}; \qquad (28)$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A} &= 3\dot{I}_{\kappa A1}\underline{Z}_{2\,рез}\underline{Z}_{0\,рез}/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right) \\ \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa B} &= 0 \\ \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa C} &= 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (29)$$

Струм на землю

$$\dot{I}_з = \dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} = 3\dot{I}_{\kappa A0}. \qquad (30)$$

Коефіцієнт пропорційності між струмами пошкодженої фази та прямої послідовності у місці КЗ оцінюємо виразом

$$m^{(1,1)} = \left|a^2 - \left(\underline{Z}_{2\,рез} + a\underline{Z}_{0\,рез}\right)/\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}\right|.$$

За умови, що активні складові опору дорівнюють нулю

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - x_{2\,рез}x_{0\,рез}/\left(x_{2\,рез} + x_{0\,рез}\right)^2}. \qquad (31)$$

Залежно від співвідношення значень $x_{2\,рез}$ та $x_{0\,рез}$ значення $m^{(1,1)}$ перебуває у межах $1,5 \le m^{(1,1)} \le \sqrt{3}$.

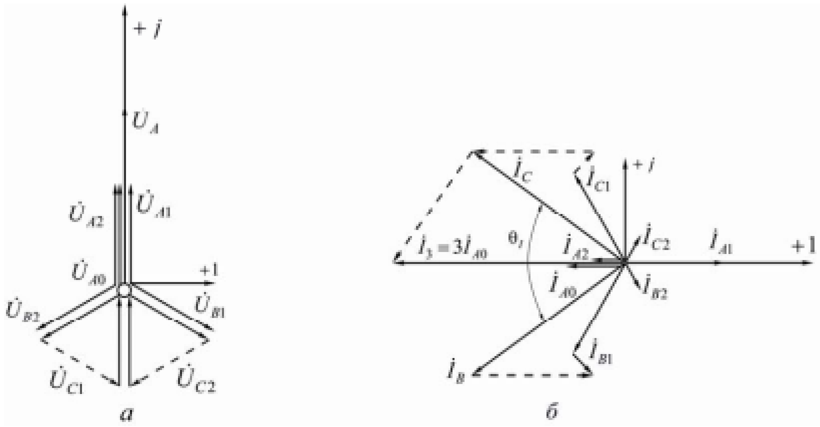

Рис. 5. Векторні діаграми фазних напруг (а) і струмів (б) та їх симетричних складових у місці двофазного КЗ на землю

На рис. 5 зображено векторні діаграми струмів та напруг у місці двофазного КЗ на землю, побудовані за тих же умов, що і векторні діаграми на рис. 3 та 4. Кут зсуву між струмами пошкоджених фаз θ_I залежить від співвідношення значень опорів $\underline{Z}_{1рез}$ та $\underline{Z}_{0рез}$ і може змінюватись у межах $60° < \theta_I < 180°$. Верхня межа відповідає значенню $\underline{Z}_{0рез} = \infty$, нижня – $Z_0 \rightarrow 0$, а за умови $\underline{Z}_{2рез} = \underline{Z}_{0рез}$ кут $\theta_I = 120°$. Як і при однофазному КЗ на землю, нульова точка системи векторів зміщена стосовно землі на значення напруги нульової послідовності. Тому слід розрізняти фазні напруги відносно землі та напруги фаз щодо нульової точки.

5. Урахування перехідного опору в місці короткого замикання

У розподільних мережах підприємств урахування перехідних опорів у місці КЗ відіграє вагому роль. Перехідний опір складається з опорів електричної дуги та елементів на шляху перебігу струму від однієї фази до іншої або від фаз на землю. Електрична дуга виникає чи з самого початку появи пошкодження, як наприклад при перекритті або пробої ізоляції, чи трохи згодом, коли руйнується елемент, що викликав КЗ. При КЗ між фазами перехідний опір визначається переважно опором електричної дуги.

Значення перехідних опорів нерідко такі малі, що практично ними можна нехтувати. Звичайно, за інших рівних умов струм з подібним КЗ вищий, ніж під час перехідного опору. Тому при необхідності знайти можливі найбільші значення струмів виходять з найважчих умов, вважаючи, що в місці КЗ ніяких перехідних опорів немає.

Розглянемо врахування перехідного опору при різних видах несиметричних КЗ. Передбачаємо, що перехідний опір в основному визначається опором електричної дуги, який у першому наближенні можна вважати активним ($r_д$).

- Нехай двофазне КЗ між фазами *B* та *C* відбулося через опір дуги $r_∂$. Його можна подати як "металеве" двофазне КЗ на відгалуженні, фази якого мають однакові опори $r_∂/2$ (рис. 6,а). Таким чином, несиметрична ділянка мережі зведена до симетричної для застосування методу симетричних складових. Введення опору $r_∂/2$ у фазу А не змінює граничних умов зазначеного КЗ, оскільки на даному відгалуженні струм у цій фазі відсутній.

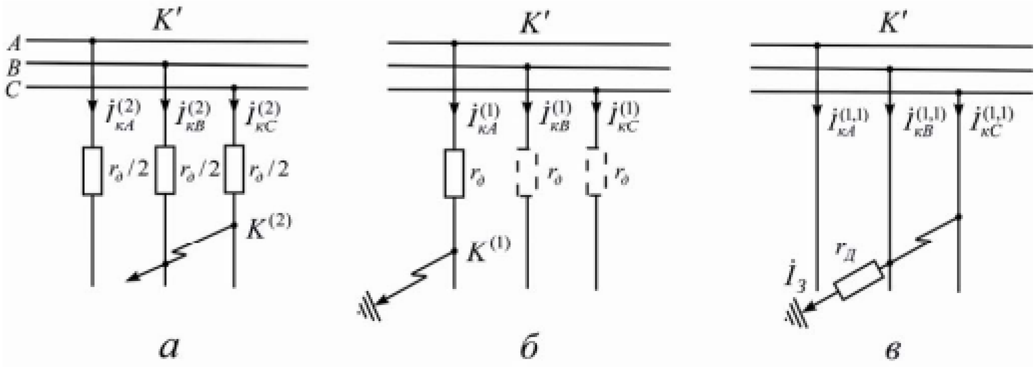

Рис. 6. Розрахункові схеми несиметричного КЗ з урахуванням перехідного опору дуги: а – двофазного; б – однофазного; в – двофазного на землю

Відповідно до (18) та (19) для точки КЗ

$$\left.\begin{aligned} \dot I^{(2)}_{\kappa A1} &= \dot E_{A\Sigma}\Big/\left(\underline Z_{1рез} + \underline Z_{2рез} + r_∂\right) \\ \dot I^{(2)}_{\kappa A2} &= -\dot I^{(2)}_{\kappa A1} \end{aligned}\right\}; \qquad (32)$$

$$\dot U^{(2)}_{\kappa A1} = \dot U^{(2)}_{\kappa A2} = \dot I^{(2)}_{\kappa A1}\left(\underline Z_{2рез} + r_∂\right). \qquad (33)$$

За виразом (32) визначаємо струми окремих послідовностей взагалі і для точки $K^{`(2)}$ зокрема. Напруга окремих послідовностей у точці $K^{`(2)}$:

$$\left.\begin{aligned} \dot U^{(2)}_{\kappa' A1} &= \dot U^{(2)}_{\kappa A1} + \dot I^{(2)}_{\kappa A1}\cdot r_∂/2 = \dot I^{(2)}_{\kappa A1}\left(\underline Z_{2рез} + r_∂\right) \\ \dot U^{(2)}_{\kappa' A2} &= \dot U^{(2)}_{\kappa A2} + \dot I^{(2)}_{\kappa A2}\cdot r_∂/2 = \dot I^{(2)}_{\kappa A1}\underline Z_{2рез} \end{aligned}\right\}. \qquad (34)$$

- Проаналізуємо замикання фази А на землю через опір дуги $r_∂$ (рис. 6,б). Щоб зберегти симетрію даної ділянки мережі, вважаємо, що такі ж опори мають і дві інші фази. Це справедливо, адже за граничними умовами для зазначеного виду пошкодження струми $I^{(1)}_{\kappa B}=0$, $I^{(1)}_{\kappa C}=0$.

Результуючий опір кожної послідовності зріс на $r_∂$. Отже, за аналогією з (10) струми прямої, зворотної та нульової послідовностей у місці КЗ

$$\dot I^{(2)}_{\kappa A1} = \dot I^{(2)}_{\kappa A2} = \dot I^{(2)}_{\kappa A0} = \dot E_{A\Sigma}\Big/\left(\underline Z_{1рез} + \underline Z_{2рез} + \underline Z_{0рез} + 3r_∂\right). \qquad (35)$$

Напруги окремих послідовностей у точці $K^{(1)}$ на відгалуженнях:

$$\left.\begin{aligned} \dot U^{(1)}_{\kappa A1} &= \dot I^{(1)}_{\kappa A1}\left(\underline Z_{2рез} + \underline Z_{0рез} + 2r_∂\right) \\ \dot U^{(1)}_{\kappa A2} &= -\dot I^{(1)}_{\kappa A2}\left(\underline Z_{2рез} + r_∂\right) \\ \dot U^{(1)}_{\kappa A0} &= -\dot I^{(1)}_{\kappa A0}\left(\underline Z_{0рез} + r_∂\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (36)$$

Струми у дійсній точці КЗ $K'^{(1)}$ визначаються за (35), а напруги окремих послідовностей у точці $K'^{(1)}$ – за другим законом Кірхгофа:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}^{(1)}_{\kappa' A1} &= \dot{U}^{(1)}_{\kappa A1} + \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1} r_{\partial} = \dot{I}^{(1)}_{\kappa A1}\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{g\partial}\right) \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa' A2} &= \dot{U}^{(1)}_{\kappa A2} + \dot{I}^{(1)}_{\kappa A2} r_{\partial} = -\dot{I}^{(1)}_{\kappa A2}\underline{Z}_{2\,рез} \\ \dot{U}^{(1)}_{\kappa' A0} &= \dot{U}^{(1)}_{\kappa A0} + \dot{I}^{(1)}_{\kappa A0} r_{\partial} = -\dot{I}^{(1)}_{\kappa A0}\underline{Z}_{0\,рез} \end{aligned}\right\}. \tag{37}$$

- При КЗ між фазами *B* та ш з одночасним замиканням у точці КЗ на землю через опір дуги r_∂ (рис. 6,в) останній ввійде потроєним значенням лише до схеми нульової послідовності. Тому струми окремих послідовностей у місці КЗ подібно до (27):

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1} &= \dot{E}^{(1)}_{A\Sigma} \Big/ \left[\begin{aligned} &\underline{Z}_{1\,рез} + \underline{Z}_{2\,рез}\left(\underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right)/ \\ &/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right) \end{aligned}\right] \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A2} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\left[\left(\underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right)/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right)\right] \\ \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A0} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\left[\underline{Z}_{2\,рез}/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right)\right] \end{aligned}\right\}. \tag{38}$$

Симетричні складові напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно до розв’язку системи рівнянь (25), де r_∂ входить лише до схеми нульової послідовності, у точці $K^{(1,1)}$ визначаємо за виразами

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A1} &= \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A1}\underline{Z}_{2\,рез}\left(\underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right)/\left(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез} + 3r_{\partial}\right) \\ \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A2} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A2}\underline{Z}_{2\,рез} \\ \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A0} &= -\dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A0}\underline{Z}_{0\,рез} \end{aligned}\right\}. \tag{39}$$

Струм у дійсній точці КЗ $K'^{(1,1)}$ та на відгалуженнях у точці $K^{(1,1)}$ однаковий. Напруга прямої та зворотної послідовностей така ж, адже опір r_∂ не входить до схем заміщення прямої та зворотної послідовностей. Напруга нульової послідовності у точці $K'^{(1,1)}$ набуває значення

$$\dot{U}^{(1,1)}_{\kappa' A0} = \dot{U}^{(1,1)}_{\kappa A0} + \dot{I}^{(1,1)}_{\kappa A0} 3r_{\partial}. \tag{40}$$