

Лекція 13

ПОЗДОВЖНЯ НЕСИМЕТРІЯ ТА СКЛАДНІ ВИДИ ПОШКОДЖЕНЬ

1. Вмикання у фази неоднакових опорів

У СЕП поздовжня несиметрія може виникати при вмиканні опорів в одну або дві фази, тобто при несиметричному навантаженні (рис. 1).

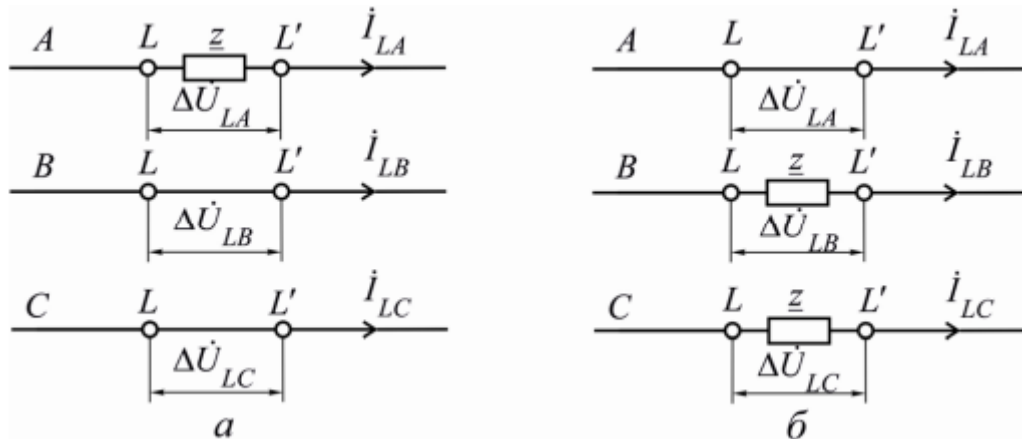


Рис. 1. Поздовжня несиметрія при вмиканні у фази опорів: а – в одну фазу; б – в дві фази

Вмикання опору z в одну фазу трифазної мережі характеризується граничними умовами у місці несиметрії:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= \dot{I}_{LA} z \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= 0 \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Під час розгляду цієї несиметрії замість опору z до фази вводимо джерело поздовжньої напруги ΔU_{LA} (рис. 1,а). При z граничні умови (1) перетворюються на окремий випадок граничних умов розриву фази, оскільки

$$\dot{I}_{LA} = \Delta \dot{U}_{LA} / z|_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (2)$$

Аналіз режиму з поздовжньою несиметрією при $z \neq \infty$ стає узагальненим. При розкладанні граничних умов (1) на симетричні складові особливої фази A залишається дійсною тотожність

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LA0} = \Delta \dot{U}_{LA} / 3;$$

та, крім того,

$$\Delta \dot{U}_{LA} = (\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}) \underline{z}. \quad (3)$$

Після спільного перетворення

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - \underline{z}_{1pez} \dot{I}_{LA1} \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= -\underline{z}_{2pez} \dot{I}_{LA2} \\ \Delta \dot{U}_{LA0} &= -\underline{z}_{0pez} \dot{I}_{LA0} \end{aligned} \right\},$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LA0} = \Delta \dot{U}_{LA} / 3;$$

і (3) матимемо вираз для синтезування комплексної схеми заміщення (рис. 2,а):

$$\dot{I}_{LA1} = (\dot{E}_{A\Sigma} - \Delta \dot{U}_{LA1}) / \underline{z}_{1pez}; \quad (4)$$

$$\dot{I}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA1} (3 / \underline{z} + 1 / \underline{z}_{2pez} + 1 / \underline{z}_{0pez}). \quad (5)$$

Для визначення струму прямої послідовності перетворюємо комплексну схему заміщення до вигляду рис. 2,б. Тут на основі (5) додатковий опір вмикаємо у місце несиметрії:

$$\underline{z}_{LL1} = 1 / (3 / \underline{z} + 1 / \underline{z}_{2pez} + 1 / \underline{z}_{0pez}). \quad (6)$$

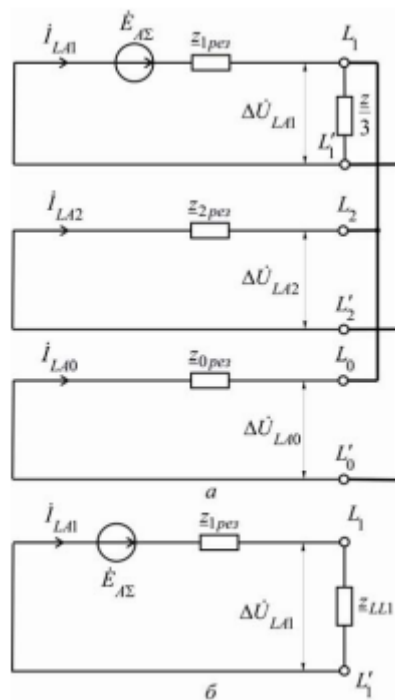


Рис. 2. Комплексна схема заміщення (а) та її еквівалентне перетворення (б)

З (6) за \underline{z} отримуємо вираз

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{I}_{LA1} \underline{z}_{LL1}.$$

що належить до випадку розриву фази. Симетричні складові струму і напруги, виражені через опір \underline{z}_{LL1} . Знаючи симетричні складові струму і напруги особливої фази А, визначимо параметри режиму всіх фаз трифазної мережі у місці її пошкодження, як і в розглянутих раніше випадках.

Вмикання у дві фази трифазної мережі опорів \underline{z} характеризується такими граничними умовами (рис. 1,б) для місця поздовжньої несиметрії:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= 0 \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= \dot{I}_{LB} \underline{z} \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= \dot{I}_{LC} \underline{z} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Перейшовши до симетричних складових напруги і струму особливої фази А, рівняння системи (7) запишемо:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0; \quad (8)$$

$$a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = (a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}) \underline{z}; \quad (9)$$

$$a \Delta \dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = (a \dot{I}_{LA1} + a^2 \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}) \underline{z}. \quad (10)$$

Їх розв'язок відносно спаду напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей дає:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= (2\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA0}) \underline{z} / 3 \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= (-\dot{I}_{LA1} + 2\dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA0}) \underline{z} / 3 \\ \Delta \dot{U}_{LA0} &= (-\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} + 2\dot{I}_{LA0}) \underline{z} / 3 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Таким чином, симетричні складові фазних величин для особливої фази А подамо системами рівнянь. Після перетворень відносно симетричних складових струму фази А рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA1}(2 + 3\underline{z}_{1pe3} / \underline{z}) - \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA0} &= 3\dot{E}_{A\Sigma} / \underline{z} \\ -\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2}(2 + 3\underline{z}_{2pe3} / \underline{z}) - \dot{I}_{LA0} &= 0 \\ -\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}(2 + 3\underline{z}_{0pe3} / \underline{z}) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Розв'язавши систему рівнянь (12), здобудемо вирази для визначення струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1}) \\ \dot{I}_{LA2} &= \dot{E}_{A\Sigma} (\underline{z} - \underline{z}_{LL1}) / [(\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1})(\underline{z} + \underline{z}_{2pe3})] \\ \dot{I}_{LA0} &= \dot{E}_{A\Sigma} (\underline{z} - \underline{z}_{LL1}) / [(\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1})(\underline{z} + \underline{z}_{0pe3})] \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

де додатковий опір у схемі заміщення для прямої послідовності, ввімкнений у місце несиметрії, визначається виразом

$$\underline{z}_{LL1} = \underline{z} \left(\frac{\underline{z} \underline{z}_{2pe3}}{\underline{z} + \underline{z}_{2pe3}} + \frac{\underline{z} \underline{z}_{0pe3}}{\underline{z} + \underline{z}_{0pe3}} \right) / \left(\underline{z} + \frac{\underline{z} \underline{z}_{2pe3}}{\underline{z} + \underline{z}_{2pe3}} + \frac{\underline{z} \underline{z}_{0pe3}}{\underline{z} + \underline{z}_{0pe3}} \right). \quad (14)$$

З використанням систем рівнянь спад напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей розраховуємо за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} \underline{z}_{LL1} / (\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1}) \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= -\dot{E}_{A\Sigma} (\underline{z} - \underline{z}_{LL1}) \underline{z}_{2pe3} / [(\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1})(\underline{z} + \underline{z}_{2pe3})] \\ \Delta \dot{U}_{LA0} &= -\dot{E}_{A\Sigma} (\underline{z} - \underline{z}_{LL1}) \underline{z}_{0pe3} / [(\underline{z}_{1pe3} + \underline{z}_{LL1})(\underline{z} + \underline{z}_{0pe3})] \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Перевірка отриманих виразів – в оцінці тотожності суми рівнянь (15) і першого рівняння граничних умов (7).

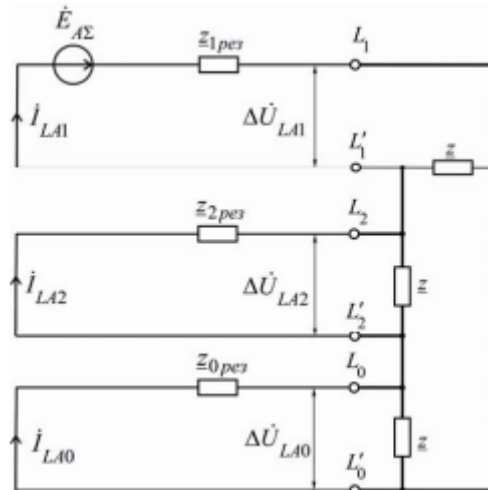


Рис. 3. Комплексна схема заміщення для особливої фази A у разі вмикання опорів z до фаз B і C

Комплексну схему заміщення особливої фази A у разі вмикання до двох фаз опорів z (рис. 3) складаємо на основі виразу, отриманого як додаток рівнянь:

$$\dot{E}_{A\Sigma} = \dot{I}_{LA} Z_{1pez} + \dot{I}_{LA2} Z_{2pez} + \dot{I}_{LA0} Z_{0pez} \quad (16)$$

За допомогою цієї схеми визначаємо симетричні складові величин фази A у місці пошкодження та будь-якій точці мережі.

Як бачимо, аналіз кожного виду одноразової поздовжньої несиметрії зводиться до одержання розрахункових співвідношень між фазними величинами та їх симетричними складовими, а також до синтезування на їх основі комплексної схеми заміщення особливої фази. Комплексна схема заміщення використовується при подальшому аналізі.

2. Подвійне замикання на землю

Подвійне замикання на землю належить до складних видів пошкоджень, які являють собою сукупність поздовжньої та поперечної несиметрій окремих ділянок електричної мережі. Порушення можуть виникати при цьому у різні моменти часу, за інших поєднаннях і місцях.

Для вирішення питань проектування та експлуатації СЕП промислових підприємств аналіз порушень симетрії у двох точках трифазної мережі з ізольованою нейтраллю і однофазне КЗ на землю з розривом тієї ж фази у мережі із заземленою нейтраллю становить практичний інтерес.

При дворазовій несиметрії необхідно визначити 12 невідомих симетричних складових, для знаходження яких скласти стільки ж незалежних

рівнянь. Кожна точка порушення характеризується для особливої фази трьома симетричними складовими струму і трьома симетричними складовими напруги. Виходячи з граничних умов, по кожному місцю порушення симетрії трифазної мережі, як і в попередніх підрозділах, для особливої фази можна скласти по три рівняння зв'язку симетричних складових струму та напруги різних послідовностей, а для кожної схеми заміщення записати рівняння, що зв'яже відповідно симетричні складові струму і напруги однойменної послідовності.

Система з 12 рівнянь може бути розв'язана аналітичними методами, моделюванням із використанням засобів обчислювальної техніки. Останні – вигідніші, адже дають змогу проаналізувати та розрахувати параметри режиму не лише у точці порушення симетрії, а й у будь-якій точці електричної мережі.

При неодноразовому порушенні симетрії складання комплексної схеми заміщення об'єднанням схем заміщення для окремих послідовностей лише за допомогою електричних зв'язків неприпустиме через можливе порушення струморозподілу в схемі. Тому схеми заміщення для окремих послідовностей об'єднують у єдину електрично зв'язану схему заміщення тільки в одній точці порушення симетрії. По другій же точці несиметрії схеми заміщення для окремих послідовностей об'єднують у комплексну схему заміщення через проміжні трансформатори.

При складанні комплексних схем заміщення з використанням проміжних трансформаторів, щоб не порушувати граничних умов, особливі фази кожного місця порушення симетрії треба узгодити, вибравши значення коефіцієнтів трансформації та відповідного кутового зсуву струму і напруги окремих послідовностей. Окрім того, слід урахувати похибку, внесену до розрахунків проміжними трансформаторами.

Подвійне замикання на землю у трифазній електричній мережі з ізолюваною нейтраллю (рис. 4,а) розглянемо за умови, що замикання на землю сталося одночасно у точці L фази B і в точці M фази C .

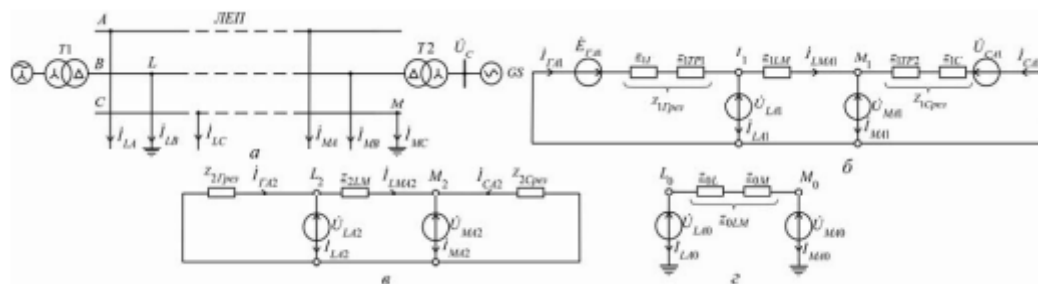


Рис. 4. Схеми в аналізі подвійного замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю: а – розрахункова; б – заміщення прямої послідовності; в – заміщення зворотної послідовності; г – заміщення нульової послідовності

Граничні умови несиметрії:

при замиканні в точці L

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA} &= 0 \\ \dot{I}_{LC} &= 0 \\ \dot{U}_{LB} &= 0 \end{aligned} \right\}; \quad (17)$$

при замиканні в точці M

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{MA} &= 0 \\ \dot{I}_{MB} &= 0 \\ \dot{U}_{MC} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Струми в замкнених на землю фазах зв'язані між собою умовою

$$\dot{I}_{LB} = -\dot{I}_{MC}. \quad (19)$$

Далі проаналізуємо зв'язок різнойменних симетричних складових струму та напруги у точках замикання на землю.

Для точки замикання на землю фази B граничним умовам (17) відповідають такі співвідношення симетричних складових струму та напруги (фаза B – особлива):

$$\dot{I}_{LB1} = \dot{I}_{LB2} = \dot{I}_{LB0} = \dot{I}_{LB} / 3; \quad (20)$$

$$\dot{U}_{LB1} + \dot{U}_{LB2} + \dot{U}_{LB0} = 0. \quad (21)$$

Аналогічно для точки замикання на землю фази C граничним умовам (18) відповідають такі співвідношення симетричних складових струму та напруги (особлива – фаза C):

$$\dot{I}_{MC1} = \dot{I}_{MC2} = \dot{I}_{MC0} = \dot{I}_{MC} / 3; \quad (22)$$

$$\dot{U}_{MC1} + \dot{U}_{MC2} + \dot{U}_{MC0} = 0. \quad (23)$$

Зіставлення складових, що входять до тотожностей (20) і (22), за умовою (19) дає можливість отримати інформацію про взаємне розміщення векторів симетричних складових струмів фаз для розглянутих точок замикання на землю (рис. 5) та їх зв'язки між собою:

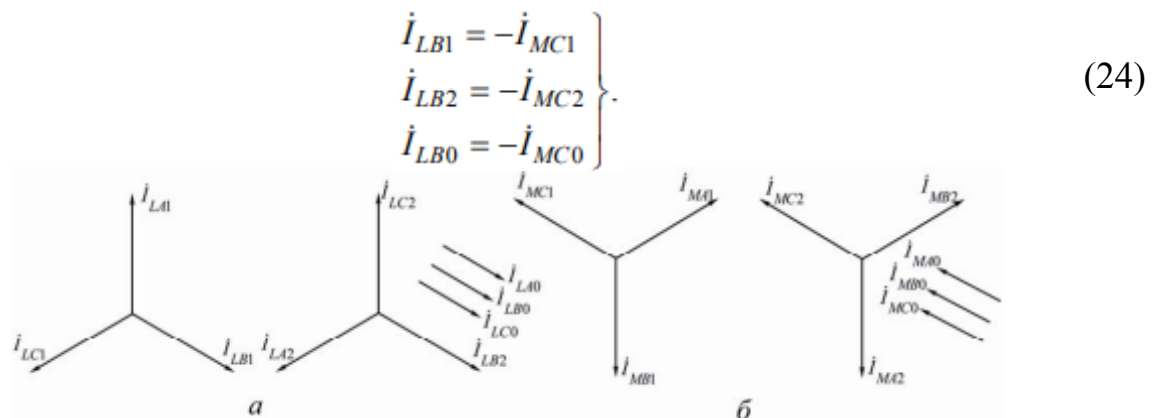


Рис. 5. Векторні діаграми симетричних складових струмів фаз B і C при подвійному замиканні на землю в точках замикання: а – у точці L ; б – у точці M

При одночасному розгляді замикань у точках L і M за особливу слід взяти фазу A , яка при складному пошкодженні перебуває в інших умовах порівняно з фазами B і C , замкненими у відповідних точках на землю. Тоді співвідношення (20)–(23) матимуть вигляд:

$$a^2 \dot{I}_{LA1} = a \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \dot{I}_{LB} / 3; \quad (25)$$

$$a \dot{I}_{MA1} = a^2 \dot{I}_{MA2} = \dot{I}_{MA0} = \dot{I}_{MC} / 3; \quad (26)$$

$$a^2 \dot{U}_{LA1} + a \dot{U}_{LA2} + \dot{U}_{LA0} = 0; \quad (27)$$

$$a \dot{U}_{MA1} + a^2 \dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{MA0} = 0. \quad (28)$$

Зв'язок між симетричними складовими струму фази A у різних точках замикання подається при цьому співвідношеннями завдяки перетворенню системи тотожностей (24):

$$\left. \begin{aligned} a \dot{I}_{LA1} &= -\dot{I}_{MA1} \\ \dot{I}_{LA2} &= -a \dot{I}_{MA2} \\ \dot{I}_{LA0} &= -\dot{I}_{MA0} \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Розрахункові співвідношення між симетричними складовими струму та напруги однойменних послідовностей можна отримати шляхом аналізу їх схем заміщення (рис. 4,б-г). Схеми заміщення для прямої та зворотної послідовностей перетворюють таким чином, щоб виділити вітки замикання на землю з невідомими симетричними складовими струму і напруги. Потім у схемах заміщення з'єднують точки рівного потенціалу (точки нульового потенціалу джерел), перетворивши одержані трикутники на трипроменеві зірки (рис. 6). Значення е.р.с. віток у перетвореній схемі заміщення для прямої послідовності (рис. 6,а) визначають за формулами:

$$\dot{E}_{LA} = [\dot{E}_{GA1}(Z_{1Cpe3} + Z_{1LM}) + \dot{U}_{CA1}Z_{1Гpe3}] / Z_{1pe3}; \quad (30)$$

$$\dot{E}_{MA} = [\dot{E}_{GA1}Z_{1Cpe3} + \dot{U}_{CA1}(Z_{1Гpe3} + Z_{1LM})] / Z_{1pe3}; \quad (31)$$

де $Z_{1pe3} = Z_{1Гpe3} + Z_{1LM} + Z_{1Cpe3}$.

Опори променів зірки схеми заміщення для прямої послідовності розраховують за формулами (для зворотної послідовності формули подібні):

$$Z_{1H} = Z_{1Гpe3}Z_{1Cpe3} / Z_{1pe3}; \quad (32)$$

$$Z_{1L} = Z_{1Гpe3}Z_{1LM} / Z_{1pe3}; \quad (33)$$

$$Z_{1M} = Z_{1LM}Z_{1Cpe3} / Z_{1pe3}. \quad (34)$$

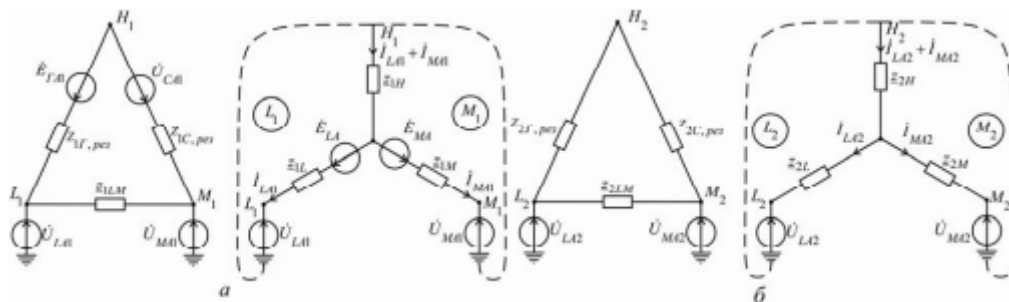


Рис. 6. Перетворення схем заміщення для послідовностей: а – прямої; б – зворотно

Симетричні складові параметрів режиму для однойменних послідовностей у точках замикання на землю зв'язані такими системами рівнянь:

у схемі заміщення для прямої послідовності (рис. 6,а; контури L_1 і M_1)

$$\dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{LA} - \dot{I}_{LA1}(z_{1L} - z_{1H}) - \dot{I}_{MA1}z_{1H}; \quad (35)$$

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - \dot{I}_{LA1}z_{1H} - \dot{I}_{MA1}(z_{1M} + z_{1H}); \quad (36)$$

у схемі заміщення для зворотної послідовності (рис. 6,б; контури L_2 і M_2)

$$\dot{U}_{LA2} = -\dot{I}_{LA2}(z_{2L} + z_{2H}) - \dot{I}_{MA2}z_{2H}; \quad (37)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -\dot{I}_{LA2}z_{2H} - \dot{I}_{MA2}(z_{2M} + z_{2H}); \quad (38)$$

у схемі заміщення для нульової послідовності (рис. 4,г)

$$\dot{U}_{LA0} = -\dot{I}_{LA0}z_{0L}; \quad (39)$$

$$\dot{U}_{MA0} = -\dot{I}_{MA0}z_{0M}. \quad (40)$$

Симетричні складові струму та напруги у точках подвійного замикання на землю описані системою незалежних рівнянь (25), (27), (28), (29), (25)–(30). Для її розв'язку необхідно скоротити число невідомих, записавши симетричні складові струмів через струми прямої послідовності на основі векторних діаграм (рис. 5) для кожної точки несиметрії:

$$\dot{I}_{LA2} = a\dot{I}_{LA1} = -\dot{I}_{MA1}; \quad (41)$$

$$\dot{I}_{LA0} = a^2\dot{I}_{LA1} = -a\dot{I}_{MA1}; \quad (42)$$

$$\dot{I}_{MA2} = a^2\dot{I}_{MA1} = -\dot{I}_{LA1}; \quad (43)$$

$$\dot{I}_{MA0} = a\dot{I}_{MA1} = -a^2\dot{I}_{LA1}. \quad (44)$$

Система рівнянь, яка розв'язується за (41)–(44), виглядатиме:

$$\left. \begin{aligned} a\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{MA1} &= 0 \\ a^2\dot{U}_{LA1} + a\dot{U}_{LA2} + \dot{U}_{LA0} + a\dot{U}_{MA1} + a^2\dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{MA0} &= 0 \\ \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{LA} - \dot{I}_{LA1}[z_{1L} + (1-a)z_{1H}] \\ \dot{U}_{LA2} &= -\dot{I}_{LA1}[az_{2L} - (1-a)z_{2H}] \\ \dot{U}_{LA0} &= -\dot{I}_{LA1}a^2z_{0L} \\ \dot{U}_{MA1} &= \dot{E}_{MA} - \dot{I}_{MA1}[z_{1M} + (1-a^2)z_{1H}] \\ \dot{U}_{MA2} &= -\dot{I}_{MA1}[a^2z_{2M} - (1-a^2)z_{2H}] \\ \dot{U}_{MA0} &= -\dot{I}_{MA1}az_{0M} \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Систему рівнянь (45) відносно струму прямої послідовності \dot{I}_{LA1} можна розв'язати з використанням її другого рівняння:

$$\dot{I}_{LA1} = (\dot{E}_{LA} - a^2\dot{E}_{MA}) / z_{рез}^{(LM)}, \quad (46)$$

де

$$z_{рез}^{(LM)} = z_{11} + z_{21} + z_{2L} + z_{1M} + z_{2M} + z_{0M} + 3z_{1H} + 3z_{2H}. \quad (47)$$

З урахуванням виразу (47) та рівнянь (41)–(45) симетричні складові струмів і напруг визначаються:

- для вітки замикання на землю в точці L , окрім струму I_{LA1} , який розраховується за (46),

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA2} &= (a\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{I}_{LA0} &= (a^2\dot{E}_{LA} - a\dot{E}_{MA}) / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{LA} - (\dot{E}_{LA} - a^2\dot{E}_{MA})[z_{1L} + (1-a)z_{1H}] / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{LA2} &= -(\dot{E}_{LA} - a^2\dot{E}_{MA})[az_{2L} - (1-a)z_{2H}] / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{LA0} &= -(a^2\dot{E}_{LA} - a\dot{E}_{MA})z_{0L} / Z_{pez}^{(LM)} \end{aligned} \right\}; \quad (48)$$

- для вітки замикання на землю в точці M

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{MA1} &= -(a\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{I}_{MA2} &= -(\dot{E}_{LA} - a^2\dot{E}_{MA}) / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{I}_{MA0} &= -(a^2\dot{E}_{LA} - a\dot{E}_{MA}) / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{MA1} &= \dot{E}_{MA} - (a\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA})[(a^2 - 1)z_{1H} - z_{1M}] / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{MA2} &= (a\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA})[(a^2 - 1)z_{2H} + z_{2M}] / Z_{pez}^{(LM)} \\ \dot{U}_{MA0} &= (a^2\dot{E}_{LA} - a\dot{E}_{MA})z_{0M} / Z_{pez}^{(LM)} \end{aligned} \right\}. \quad (49)$$

За виразами (48) і (49) визначаємо струми та напруги в замкнених вітках з точками L і M . Отримані вирази повинні відповідати граничним умовам (8.38) і (18). Струми замикання в пошкоджених фазах устанавлюють за виразами (25) і (26):

$$\dot{I}_{LB} = -\dot{I}_{MC} = 3a^2\dot{I}_{LA1} = 3\dot{I}_{LA0}. \quad (50)$$

Струми фаз на інших ділянках електричної мережі знаходять через симетричні складові струмів на цих ділянках з урахуванням розподілу симетричних складових струмів віток замикання. Струм замикання кожної послідовності по ділянках електричної мережі розподіляється для кожної точки замикання за умови відсутності струму замикання у другій точці з використанням коефіцієнтів струморозподілу. Струм кожної послідовності ділянки електричної мережі визначається як сума складових, які відповідають складовим струму замикання на землю для кожної точки пошкодження, що перебігає цією ділянкою:

$$\dot{I}_{Ai} = c_i^{(L)}\dot{I}_{LAi} + c_i^{(M)}\dot{I}_{MAi}. \quad (51)$$

Тут I_{Ai} – струм i -ї послідовності, який перебігає ділянкою мережі; $c_i^{(L)}$ – коефіцієнт струморозподілу для ділянки мережі, знайдений при $I_{*LAi} = 1$ та $I_{*MAi} = 0$; $c_i^{(M)}$ – коефіцієнт струморозподілу для ділянки мережі, обчислений за $I_{*LAi} = 0$ та $I_{*MAi} = 1$.

Коефіцієнти струморозподілу на ділянці електричної мережі "генератор – точка замикання L " у схемі заміщення прямої послідовності (рис. 4,а) розраховуємо за формулами:

$$c_1^{(L)} = (z_{1LM} + z_{1Cpez}) / z_{1pez}; \quad c_1^{(M)} = z_{1Cpez} / z_{1pez}, \quad (52)$$

а струм прямої послідовності – за формулою

$$\dot{I}_{GA1} = \dot{I}_{LA1} [z_{1LM} + (1-a)z_{1Cpez}] / z_{1pez} \quad (53)$$

Струм зворотної послідовності на розглянутій ділянці схеми заміщення для зворотної послідовності визначають за аналогічною формулою

$$\dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{LA1} [az_{2LM} - (1-a)z_{2Cpez}] / z_{2pez} \quad (54)$$

де $z_{2pez} = z_{2Гpez} + z_{2LM} + z_{2Cpez}$.

Струм нульової послідовності на даній ділянці не перебігає, оскільки тут трансформатор із з'єднанням обмоток за схемою "зіркатрикутник", коли $Z_{OTP} \rightarrow \infty$. Струми фаз на ділянці визначаються виразами:

$$\dot{I}_{GA} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{LA1} \left[\frac{z_{1LM} + (1-a)z_{1Cpez}}{z_{1pez}} + \frac{az_{2LM} - (1-a)z_{2Cpez}}{z_{2pez}} \right]; \quad (55)$$

$$\dot{I}_{GB} = a^2 \dot{I}_{GA1} + a \dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{LA1} \left[\frac{a^2 z_{1LM} + (a^2 - 1)z_{1Cpez}}{z_{1pez}} + \frac{a^2 z_{2LM} + (a^2 - a)z_{2Cpez}}{z_{2pez}} \right]; \quad (56)$$

$$\dot{I}_{GC} = a \dot{I}_{GA1} + a^2 \dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{LA1} \left[\frac{az_{1LM} + (a - a^2)z_{1Cpez}}{z_{1pez}} + \frac{z_{2LM} + (1 - a^2)z_{2Cpez}}{z_{2pez}} \right]. \quad (57)$$

Якщо припустити рівність значень опорів прямої та зворотної послідовностей елементів електричної мережі, то з урахуванням (50) вирази (55)–(57) значно спрощуються. Спрощені вирази для визначення симетричних складових струму особливої фази A і струмів фаз на ділянках мережі (рис. 4) наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Вирази для визначення струмів на ділянках електричної мережі

Ділянка мережі	Симетрична складова струму фази A для послідовності			Струм фаз		
	прямої	зворотної	нульової	A	B	C
Вітка замикання з точкою L	$\frac{\dot{E}_{LA} - a^2 \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}} = \dot{I}_{LA1}$	$\frac{a \dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}}$	$\frac{a^2 \dot{E}_{LA} - a \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}}$	0	$3a^2 \dot{I}_{LA1} = 3 \dot{I}_{LA0} = \dot{I}_{LB}$	0
Вітка замикання з точкою M	$\frac{-a \dot{E}_{LA} + \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}}$	$\frac{-\dot{E}_{LA} + a^2 \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}}$	$\frac{-a^2 \dot{E}_{LA} + a \dot{E}_{MA}}{z_{pez}^{(LM)}}$	0	0	$-3a^2 \dot{I}_{LA1} = -3 \dot{I}_{LA0}$
Генератор G – точка L	$\frac{\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} [z_{1LM} + (1-a)z_{1Cpez}]$	$\frac{\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} [az_{1LM} - (1-a)z_{1Cpez}]$	0	$-\dot{I}_{LB} \frac{z_{1LM}}{3z_{1pez}}$	$\frac{\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (2z_{1LM} + 3z_{1Cpez})$	$\frac{-\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (z_{1LM} + 3z_{1Cpez})$
Точка L – точка M	$\frac{-\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} (z_{1z,pez} + az_{1Cpez})$	$\frac{-\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} (az_{1Гpez} + z_{1Cpez})$	$-a^2 \dot{I}_{LA1}$	$-\dot{I}_{LB} \frac{z_{1LM}}{3z_{1pez}}$	$\frac{-\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (3z_{1Гpez} + z_{1LM})$	$\frac{-\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (z_{1LM} + 3z_{1Cpez})$
Точка M – шини системи GS	$\frac{\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} [(1-a) \times z_{1Гpez} - az_{1LM}]$	$\frac{-\dot{I}_{LA1}}{z_{1pez}} [(1-a) \times z_{1z,pez} + z_{1LM}]$	0	$\dot{I}_{LB} \frac{z_{1LM}}{3z_{1pez}}$	$\frac{\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (3z_{1z,pez} + z_{1LM})$	$\frac{-\dot{I}_{LB}}{3z_{1pez}} (3z_{1Гpez} + 2z_{1LM})$

Напруги фаз у різних точках електричної мережі знаходять за симетричними складовими напруги у цих точках, які визначають за отриманими симетричними складовими струмів на ділянках мережі.

3. Однофазне коротке замикання одночасне з розривом фази

Цей вид поздовжньої несиметрії розглянемо в електричній мережі із заземленою нейтраллю, розрахункова схема якої – на рис. 6,а.

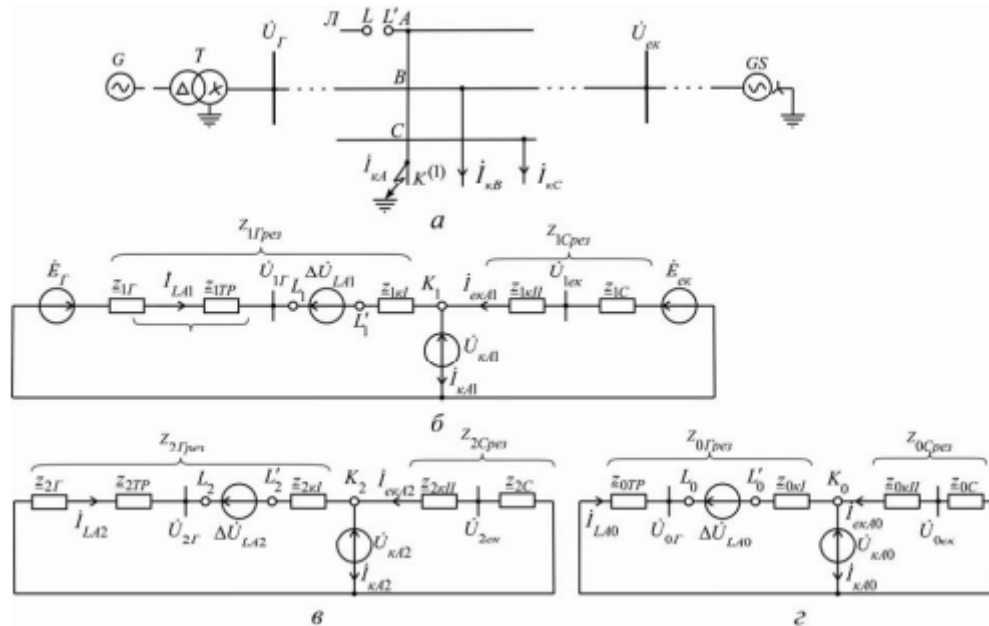


Рис. 6. Схеми аналізу однофазного КЗ, одночасного з розривом фази А: а – розрахункова; б – заміщення прямої послідовності; в – заміщення зворотної послідовності; г – заміщення нульової послідовності

Граничні умови пошкоджень:

- для розриву фази А в точці L

$$\dot{I}_{LA} = 0; \Delta \dot{U}_{LB} = 0; \Delta \dot{U}_{LC} = 0; \quad (58)$$

- при однофазному КЗ фази А на землю в точці K

$$\dot{U}_{KA} = 0; \dot{I}_{KB} = 0; \dot{I}_{KC} = 0. \quad (59)$$

Розглядаючи фазу А за особливу та використавши відповідні розрахункові співвідношення, для симетричних складових струмів і напруг у точках пошкоджень отримаємо:

- для точки розриву фази А

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2}; \quad (60)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LA0}; \quad (61)$$

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = 0; \quad (62)$$

- для точки однофазного КЗ

$$\dot{I}_{кА1} = \dot{I}_{кА2}; \quad (63)$$

$$\dot{I}_{кА2} = \dot{I}_{кА0}; \quad (64)$$

$$\dot{U}_{кА1} + \dot{U}_{кА2} + \dot{U}_{кА0} = 0. \quad (65)$$

Розрахункові співвідношення між симетричними складовими струмів та напруг у вітках пошкоджень для однойменних послідовностей можна отримати із схем заміщення для кожної послідовності на основі другого закону Кірхгофа. При складанні схем заміщення для послідовностей до віток пошкоджень мають бути введені джерела з напругою, рівною відповідній послідовності (рис. 6,б-г). Так, за схемами заміщення складаємо рівняння:

- для прямої послідовності (рис. 6,б)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_Г - \dot{E}_{ек} - \dot{I}_{LA1} Z_{1Г\text{рез}} + (\dot{I}_{кА1} - \dot{I}_{LA1}) Z_{1C\text{рез}}; \quad (66)$$

$$\dot{U}_{кА1} = \dot{E}_{ек} + (\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{кА1}) Z_{1C\text{рез}}; \quad (67)$$

- для зворотної послідовності (рис. 6,в)

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -\dot{I}_{LA2} Z_{2Г\text{рез}} + (\dot{I}_{кА2} - \dot{I}_{LA2}) Z_{2C\text{рез}}; \quad (68)$$

$$\dot{U}_{кА2} = (\dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{кА2}) Z_{2C\text{рез}}; \quad (69)$$

- для нульової послідовності (рис. 6,г)

$$\Delta \dot{U}_{LA0} = -\dot{I}_{LA0} Z_{0Г\text{рез}} + (\dot{I}_{кА0} - \dot{I}_{LA0}) Z_{0C\text{рез}}; \quad (70)$$

$$\dot{U}_{кА0} = (\dot{I}_{LA0} - \dot{I}_{кА0}) Z_{0C\text{рез}}. \quad (71)$$

Таким чином, параметри режиму у вітках пошкоджень описуються системою з 12 незалежних рівнянь (60)–(71). Результати розв'язку цієї системи зведені до табл. 2. Там же розміщені вирази (для визначення симетричних складових струмів у вітках розрахункової схеми), де – такі позначення:

$$Z_{C\text{рез}}^{(1)} = Z_{1C\text{рез}} + Z_{2C\text{рез}} + Z_{0C\text{рез}};$$

$$Z_{C1-2} = Z_{1C\text{рез}} - Z_{2C\text{рез}};$$

$$Z_{C1-0} = Z_{1C\text{рез}} - Z_{0C\text{рез}};$$

$$Z_{C2-0} = Z_{2C\text{рез}} - Z_{0C\text{рез}};$$

$$Z_{1\text{рез}} = Z_{1Г\text{рез}} + Z_{1C\text{рез}};$$

$$Z_{2\text{рез}} = Z_{2Г\text{рез}} + Z_{2C\text{рез}};$$

$$Z_{0\text{рез}} = Z_{0Г\text{рез}} + Z_{0C\text{рез}};$$

$$\Delta_A = Z_{1\text{рез}} Z_{2\text{рез}} + Z_{1\text{рез}} Z_{0\text{рез}} + Z_{2\text{рез}} Z_{0\text{рез}};$$

$$\Delta = Z_{C\text{рез}}^{(1)} \Delta_A - Z_{0\text{рез}} Z_{C1-2}^2 - Z_{2\text{рез}} Z_{C1-0}^2 - Z_{1\text{рез}} Z_{C2-0}^2.$$

За відомими симетричними складовими струмів у вітках електричної мережі, е.р.с. генераторів та джерел електричної системи легко розрахувати напругу в точках мережі, які нас цікавлять. Мінусуючи від значення е.р.с. джерела спад напруги на ділянках між джерелом і заданою точкою мережі, за обчисленими симетричними складовими струму та напруги в заданих точках знаходимо фазні напруги і струми фаз.

Таким чином, складні види пошкоджень у СЕП аналізують за такою низкою дій:

- 1) складають розрахункову схему електричної мережі та виділяють вітки з пошкодженнями;
- 2) установлюють граничні умови для кожної точки пошкодження симетрії;
- 3) визначають особливу фазу;
- 4) виражають граничні умови в точці несиметрії через розрахункові співвідношення між однойменними симетричними складовими струмів та напруг;
- 5) складають схеми заміщення особливої фази для кожної послідовності та на їх основі визначають розрахункові співвідношення між симетричними складовими струмів та напруг однойменних послідовностей;
- 6) розв'язують систему незалежних рівнянь для визначення симетричних складових струмів та напруг у вітках пошкоджень;
- 7) знаходять симетричні складові струмів та напруг у заданих вітках і точках електричної мережі;
- 8) обчислюють повні струми фаз і фазні напруги у зазначених вітках та точках електричної мережі.

Таблиця 2

Вирази симетричних складових струмів та напруг у вітках електричної мережі

Вітка мережі	Симетрична складова	Розрахунковий вираз
З розривом у точці L	\dot{I}_{LA1}	$\{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})[(z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}})z_{C\text{pez}}^{(1)} - z_{C2-0}^2] + \dot{E}_{ек}(z_{0\text{pez}}z_{C1-0} + z_{2\text{pez}}z_{C2-0})\} / \Delta$
	\dot{I}_{LA2}	$\{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})(z_{C1-0}z_{C2-0} - z_{0\text{pez}}z_{C\text{pez}}^{(1)}) + \dot{E}_{ек}(z_{1\text{pez}}z_{C2-0} - z_{0\text{pez}}z_{C1-2})\} / \Delta$
	\dot{I}_{LA0}	$\{-(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})(z_{2\text{pez}}z_{C\text{pez}}^{(1)} + z_{C1-2}z_{C2-0}) - \dot{E}_{ек}(z_{1\text{pez}}z_{C2-0} + z_{2\text{pez}}z_{C1-0})\} / \Delta$
	$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2} = \Delta\dot{U}_{LA0}$	$\{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})(z_{2\text{pez}}z_{0\text{pez}}z_{C\text{pez}}^{(1)} + z_{2\text{pez}}z_{0\text{pez}}z_{C1-0} + z_{0\text{pez}}z_{2\text{pez}}z_{C1-2}) + \dot{E}_{ек}(z_{1\text{pez}}z_{2\text{pez}}z_{0\text{pez}}z_{C\text{pez}} + z_{1\text{pez}}z_{2\text{pez}}z_{0\text{pez}}z_{C1-2} + z_{2\text{pez}}z_{0\text{pez}}z_{1\text{pez}}z_{C\text{pez}})\} / \Delta$
Однофазного КЗ у точці K	$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{KA0}$	$\{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})(z_{2\text{pez}}z_{C1-0} + z_{0\text{pez}}z_{C1-2}) + \dot{E}_{ек}\Delta_A\} / \Delta$
	\dot{U}_{KA1}	$\dot{E}_{ек} + \{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})z_{1\text{Cpez}}[(z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}})z_{C\text{pez}}^{(1)} - z_{C2-0}^2 - z_{2\text{pez}}z_{C1-0} - z_{0\text{pez}}z_{C2-0}] + \dot{E}_{ек}z_{1\text{Cpez}}(z_{2\text{pez}}z_{C1-0} + z_{0\text{pez}}z_{C1-2} - \Delta_A)\} / \Delta$
	\dot{U}_{KA2}	$\{(\dot{E}_\Gamma - \dot{E}_{ек})z_{2\text{Cpez}}(z_{C1-0}z_{C2-0} - z_{0\text{pez}}z_{C\text{pez}}^{(1)} - z_{2\text{pez}}z_{C1-0} - z_{0\text{pez}}z_{C1-2}) + \dot{E}_{ек}z_{2\text{Cpez}}(z_{1\text{pez}}z_{C2-0} - z_{0\text{pez}}z_{C1-2} - \Delta_A)\} / \Delta$

Вітка мережі	Симетрична складова	Розрахунковий вираз
Точка K – шини системи GS	\dot{U}_{KA0}	$[-(\dot{E}_r - \dot{E}_{ek})z_{0Cpes}(z_{2pes}z_{Cpes}^{(1)} + z_{C1-2}z_{C2-0} + z_{2pes}z_{C1-0} + z_{0pes}z_{C1-2}) - \dot{E}_{ek}z_{0Cpes}(z_{1pes}z_{C2-0} - z_{2pes}z_{C1-1} - \Delta_A)] / \Delta$
	\dot{I}_{ekA1}	$\{(\dot{E}_r - \dot{E}_{ek})[z_{2pes}z_{C1-0} + z_{0pes}z_{C1-2} - (z_{2pes} + z_{0pes})z_{Cpes}^{(1)} + z_{C2-0}^2] + \dot{E}_{ek}(\Delta_A - z_{2pes}z_{C1-0} - z_{0pes}z_{C1-2})\} / \Delta$
	\dot{I}_{ekA2}	$\{(\dot{E}_r - \dot{E}_{ek})[z_{2pes}z_{C2-0} + z_{0pes}(z_{Cpes}^{(1)} + z_{C1-2}) - z_{C1-0}z_{C2-0}] + \dot{E}_{ek}(\Delta_A - z_{1pes}z_{C2-0} + z_{0pes}z_{C1-2})\} / \Delta$
	\dot{I}_{ekA0}	$\{(\dot{E}_r - \dot{E}_{ek})[z_{2pes}(z_{Cpes}^{(1)} + z_{C1-0}) + z_{0pes}z_{C1-2} + z_{C1-2}z_{C2-0}] + \dot{E}_{ek}(\Delta_A + z_{1pes}z_{C2-0} + z_{2pes}z_{C1-0})\} / \Delta$