

Лекція 1
(4 години)
СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ
ТА ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

План лекції

1. Загальні відомості про короткі замикання та замикання на землю.
2. Початковий період короткого замикання (к.з.).
3. Складання розрахункових та еквівалентних схем мережі.
4. Визначення струмів к.з. в мережах напругою вище 1000 В.
5. Визначення струмів к.з. в мережах напругою до 1000 В.
6. Визначення струмів замикання на землю в мережах із незаземленою нейтраллю.

В процесі експлуатації електричної мережі можливі різні порушення нормального режиму роботи – спад напруги, перевантаження, короткі замикання, які можуть призвести до пошкодження і навіть руйнування електричної апаратури та струмопроводів. Причинами аварій можуть бути пошкодження ізоляції або помилкові дії обслуговуючого персоналу при оперативних перемиканнях.

Щоб зменшити збитки, спричинені аварійними режимами в мережі, необхідно якомога скоріше вимкнути пошкоджений елемент мережі. Захист електроустановок від аварійних режимів або порушень нормального режиму роботи здійснює спеціальний автоматичний пристрій – **релейний захист**.

1 Загальні відомості про короткі замикання та замикання на землю

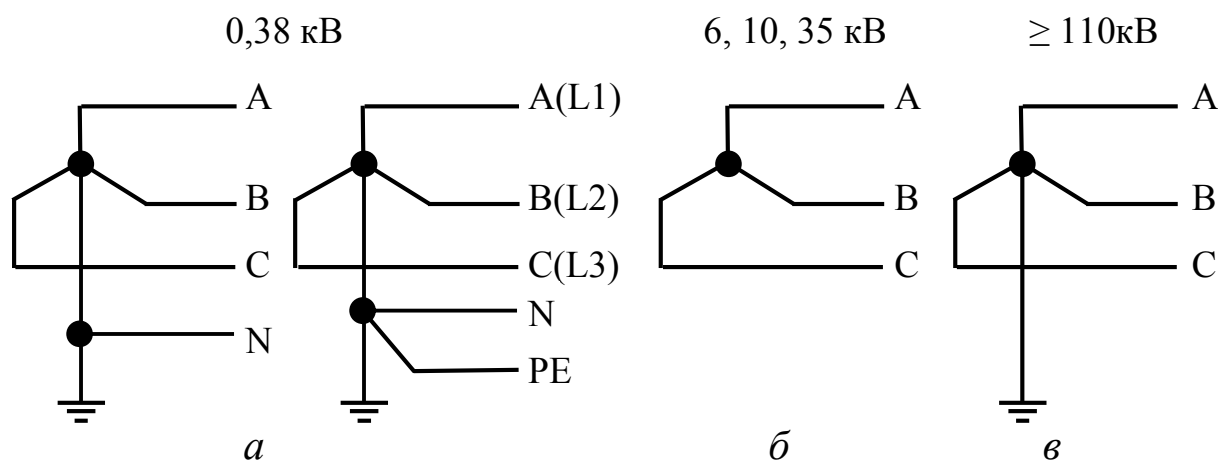
Трифазні електричні мережі можуть працювати як з ізольованою так і з заземленою нейтраллю.

Нейтраль обмотки трансформатора, що приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо, або через малий опір називають глухо заземленою, а мережі, які приєднані до такої обмотки – *мережами із глухо заземленою нейтраллю*.

Нейтраль, яка не приєднана до заземлюючого пристрою, або приєднана до нього через індуктивний опір, налаштований на ємність мережі, називають ізольованою нейтраллю. Електричні мережі, що працюють у такому режимі називають *мережами з ізольованою нейтраллю*, а при наявності компенсуючих пристроїв – *із компенсованою нейтраллю*.

В Україні режим нейтралі мережі вирішується в залежності від її номінальної напруги. В мережах напругою 380 В поряд із трьома фазними проводами прокладають четвертий (четвертий та п'ятий) нульовий провід (нульовий та захисний), який заземлюють на початку і в кінці лінії, а також в проміжних точках (повторне заземлення). Таким чином на напругу 380 В споруджують чотирипровідні (п'ятипровідні) мережі із глухо заземленою нейтраллю (рисунок 1, а).

В електричних мережах напругою 6, 10 та 35 кВ – нейтраль ізольована від землі і лінії виконують трипровідними (три фазних проводи). В окремих випадках нейтраль може з'єднуватися із землею через значний індуктивний опір (реактор). Як наслідок, такі мережі є мережами з ізольованою (компенсованою) нейтраллю (рисунок 1, б).



а – чотирипровідна (п'ятипровідна) електрична мережа із глухо заземленою нейтраллю; б – трипровідна мережа з ізольованою нейтраллю; в – трипровідна електрична мережа із глухо заземленою нейтраллю

Рисунок 1 – Режим нейтралі електричних мереж

В електричних мережах напругою 110 кВ і вище, хоч і прокладають лише три фазних проводи, але нейтраль трансформаторів

заземлюють (глухо або через невеликий опір). Таким чином отримують трипровідні мережі із глухо заземленою нейтраллю (з ефективно заземленою нейтраллю) (рисунок 1, в).

В мережах до 1000 В нейтраль заземлюють в основному із міркувань безпеки, а в мережах високої напруги (понад 1000 В) – для забезпечення мінімальної вартості ізоляції. При однофазних замиканнях напруга на непошкоджених фазах становить приблизно 0,8 міжфазної напруги в нормальному режимі роботи.

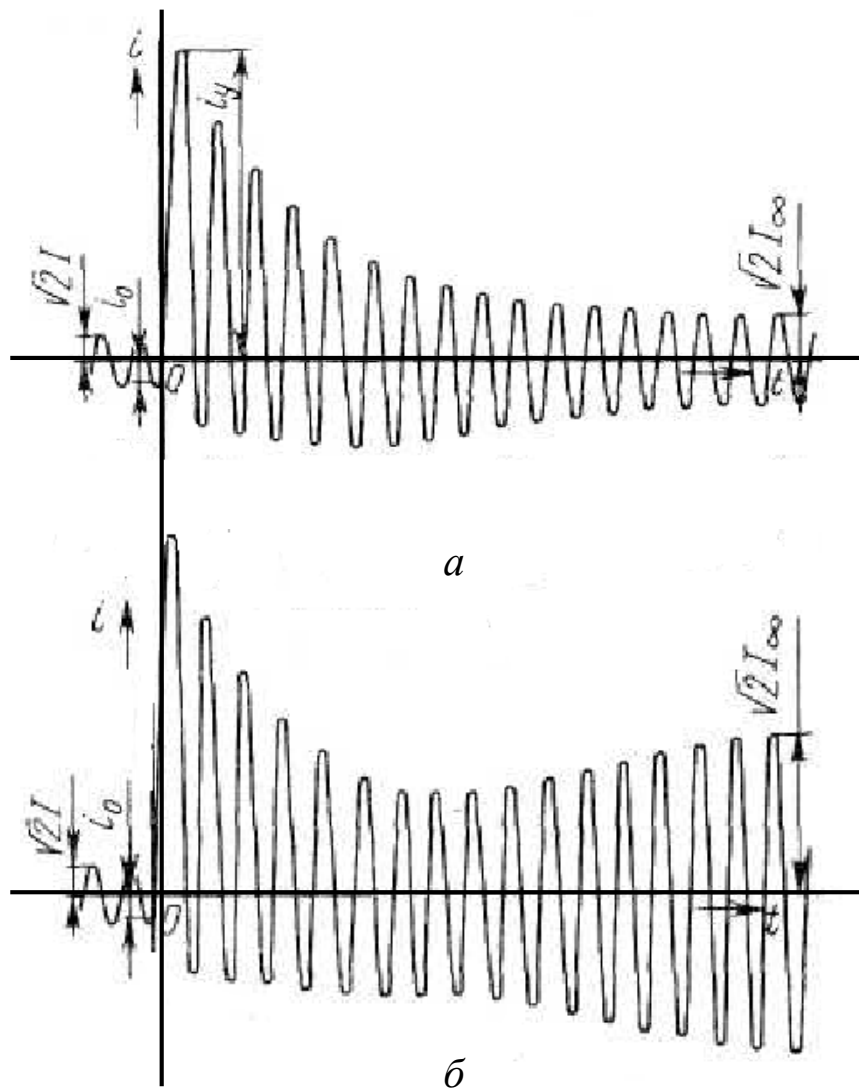
Однією із основних причин порушення нормальної роботи електричних установок є короткі замикання в них.

Коротким замиканням називається будь-яке, не передбачене нормальними умовами роботи, замикання між фазами, а в мережах із заземленою нейтраллю також замикання однієї або декількох фаз на землю (або на нульовий провід).

В системах з ізолюваною нейтраллю (6, 10, 35 кВ) замикання на землю однієї фази не є коротким замиканням, воно так і називається – **замикання на землю**. Одночасне замикання на землю двох різних фаз в системах із ізолюваною нейтраллю є **двофазним коротким замиканням через землю**.

Внаслідок короткого замикання (к.з.) значно підвищується сила струму в мережі. На рисунку 2, а наведено осцилограму струму к.з. при замиканні біля електростанції із генераторами, що не мають автоматичних регуляторів збудження (АРЗ). До к.з. в лінії було навантаження із струмом I . Коротке замикання сталося тоді, коли миттєве значення струму становило i_0 . На початку першого напівперіоду струм к.з збільшився до найбільшого миттєвого значення i_y , яке називається **ударним струмом**. В наступні періоди струм к.з. плавно зменшується до усталеного значення I_∞ .

Якщо ж коротке замикання відбувається неподалік від генератора із АРЗ (рисунок 2, б), то процес протікає дещо по-іншому. Після к.з. напруга в мережі знижується, АРЗ вступає в дію і підвищує напругу в мережі і, відповідно, підвищується значення усталеного струму к.з. I_∞ .



а – к.з. біля генератора без АРЗ; *б* – к.з. біля генератора із АРЗ

Рисунок 2 – Осцилограма струму короткого замикання

Найпростішим видом короткого замикання, із точки зору сприйняття процесу, є симетричне трифазне коротке замикання. При такому к.з. опір усіх трьох фаз до точки к.з. буде однаковим. Позначається симетричне трифазне к.з. наступним чином: $K^{(3)}$.

До несиметричних к.з. можна віднести двофазне (двополюсне) коротке замикання $K^{(2)}$, двофазне на землю $K^{(1.1)}$ і однофазне (однополюсне) к.з. $K^{(1)}$. Останній вид к.з. може спостерігатися лише в системах (електричних мережах) із заземленою нейтраллю.

В електричних мережах із заземленою нейтраллю до 65 % від загальної кількості к.з. становлять однофазні к.з., 20 % – двофазні замикання на землю, 10 % – двофазні к.з., і лише до 5% – трифазні к.з.

В мережах з ізольованою нейтраллю 60...70 % становлять двофазні к.з. і лише до 30 % – трифазні к.з.

Причини виникнення короткого замикання в електричних мережах:

- порушення ізоляції внаслідок атмосферних або комутаційних перенапруг;
- порушення ізоляції внаслідок її старіння;
- механічне пошкодження ізоляції птахами, тваринами, деревами або внаслідок діяльності людей;
- замикання внаслідок помилок обслуговуючого персоналу.

Наслідки виникнення струмів к.з.

При короткому замиканні, внаслідок протікання в мережі значних струмів, що в декілька разів перевищують значення струмів нормального режиму, може підвищуватися температура струмоведучих частин, що може привести до їх пошкодження.

Також при протіканні струмів к.з. можуть виникати електродинамічні зусилля, які ведуть до пошкодження обладнання.

Зниження напруги в мережі при к.з. веде до виходу із ладу електродвигунів.

Для запобігання або для зведення до мінімуму негативних наслідків від к.з. потрібно вміти розраховувати струми к.з. Необхідно розраховувати максимальні та мінімальні струми к.з. мережі.

Максимальні значення струмів к.з. розраховують для:

- вибору струмоведучих частин та електричних апаратів;
- перевірки струмоведучих частин та електричних апаратів на термічну та динамічну стійкість;
- проектування (розрахунку параметрів) релейного захисту;
- вибору засобів обмеження струмів.

Мінімальні значення струмів к.з. розраховують для розрахунку параметрів та налаштування релейного захисту і перевірки його на надійність роботи (чутливість).

Для визначення максимальних струмів к.з. в заданих точках мережі приймають ряд припущень:

- всі джерела живлення включені і працюють із номінальним навантаженням;

- всі синхронні генератори електростанцій оснащені пристроями АРЗ і мають форсування збудження;
- розрахункова напруга кожного ступеня мережі на 5% більша від номінальної;
- насичення магнітних систем відсутнє;
- для всіх елементів мережі враховується лише реактивний опір. Активний опір враховується лише тоді, коли його значення перевищує 0,33 індуктивного;
- струмами намагнічування трансформаторів нехтують;
- опір в місці к.з. приймається рівним нулю;
- при к.з. поблизу електростанцій частота обертання генераторів залишається незмінною.

2 Початковий період короткого замикання

Як відомо із курсу «Теоретичні основи електротехніки», при вмиканні на сталу напругу змінного струму електричного кола, що включає в себе послідовно з'єднані активний опір r та індуктивність із коефіцієнтом самоіндукції L справедливим є диференціальне рівняння:

$$u = i \cdot r + L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

де i, u – миттєві значення струму та напруги;

t – час з моменту включення кола під напругу.

Розв'язання рівняння (1) дає змогу визначити струм в колі i_k , який і є струмом короткого замикання:

$$i_k = \frac{U_{\max}}{z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + K \cdot e^{-\frac{r}{L}t},$$

$$i_k = I_{n.\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + K \cdot e^{-\frac{r}{L}t} = i_n + i_a, \quad (2)$$

де U_{\max} – максимальне значення прикладеної до кола синусоїдальної напруги;

z – опір кола;

ω – частота змінного струму, $\omega = 2\pi f$;

α – кут фази підключення кола на напругу u ;

φ_k – кут зсуву між струмом к.з. i_k та напругою u , $\varphi_k \approx 90^\circ$;

K – стала, яка визначається із початкових умов;

e – основа натурального логарифму;

i_n – періодична синусоїдальна складова струму к.з.;

i_a – аперіодична затухаюча експоненціальна складова.

Із виразу (2) видно, що струм короткого замикання i_k складається із двох частин – періодичної синусоїдальної складової i_n та аперіодичної затухаючої експоненціальної складової i_a .

Для визначення величини K розглянемо вираз (2) в момент часу $t = 0$:

$$i_{k0} = i_{n0} = i_{n0} + i_{a0} = I_{n.\max} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) + K. \quad (3)$$

Звідки можемо визначити постійну K :

$$K = i_{a0} = i_{n0} - i_{n0}. \quad (4)$$

З іншої сторони, відношення L/r є постійною часу експоненціальної кривої аперіодичної складової струму к.з.:

$$T_a = \frac{L}{r} = \frac{x}{\omega \cdot r}. \quad (5)$$

Остаточно рівняння для миттєвого значення струму к.з. прийме вигляд:

$$i_k = i_n + i_a = I_{n.\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (6)$$

У початковий період короткого замикання нас цікавить найбільше можливе значення струму к.з., тобто умови, при яких аперіодична складова i_{a0} буде максимальною.

Із виразу (4) випливає, що аперіодична складова дорівнює абсолютному значенню періодичної складової лише при $i_{n0} = 0$, тоді

$$i_{a0} = -i_{n0}.$$

Якщо в електричному колі є струм навантаження, то i_{a0} зменшується на значення цього струму. Отже, однією із умов отримання найбільшого можливого для даної схеми струму к.з. в початковий період є відсутність навантаження в колі, що замикається.

Найбільше значення періодичної складової при $t = 0$, очевидно, може дорівнювати:

$$i_{n0} = I_{n.\max}.$$

Це можливо лише у випадку коли $\varphi_k \approx 90^\circ$, якщо коротке замикання виникло при переході струму через нуль, тобто коли $\alpha = 0$ (рисунок 3).

В цьому випадку струм к.з. в момент $t = 0$:

$$i_{k0} = I_{n.\max} \cdot \sin(-90^\circ) + I_{n.\max} = 0.$$

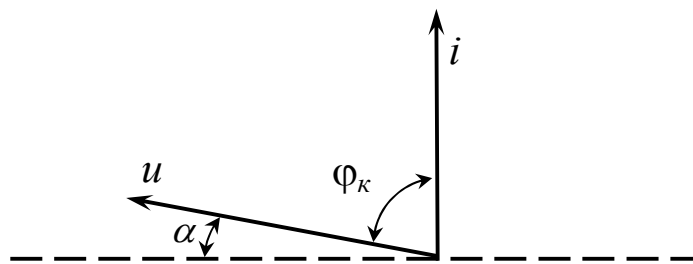


Рисунок 3 Умови утворення найбільшого значення періодичної складової струму к.з. в початковий момент короткого замикання

На рисунку 4 зображено криву струму к.з. i_k та його складових i_n та i_a при найбільшому, можливому в даних умовах, значенні аперіодичної складової. Крива періодичної складової представляє собою синусоїду із $I_{n.\max} = const$.

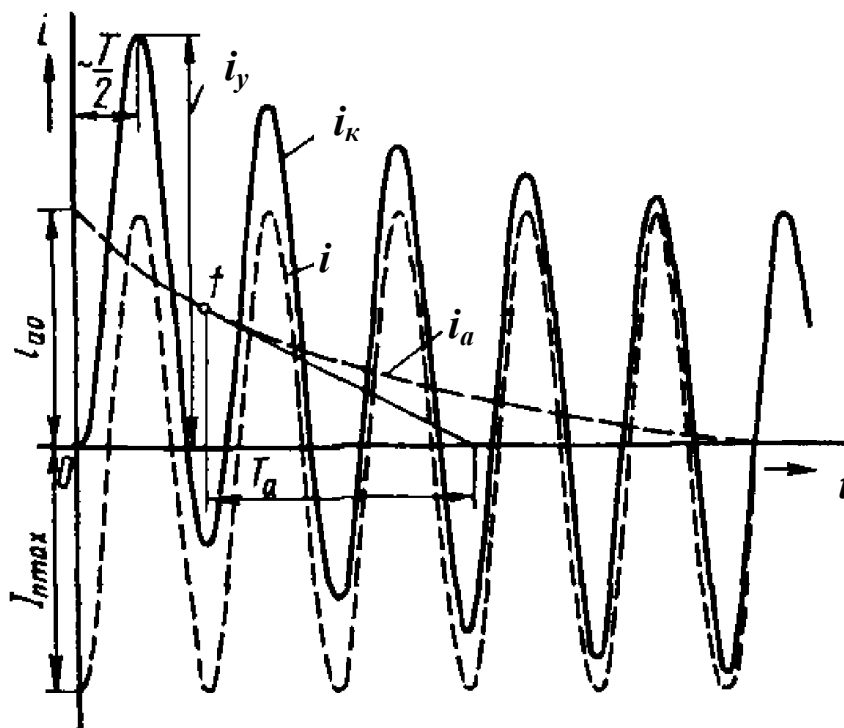


Рисунок 4 – Криві струму короткого замикання та його складових при найбільшому значенні аперіодичної складової

Крива аперіодичної складової i_a є експоненціальною затухоючою кривою. Стала часу T_a є піддотичною до цієї кривої в будь-якій її точці (наприклад в точці f , рисунок 4).

Крива струму к.з. отримується при підсумовуванні значень періодичної та аперіодичної складових струму к.з. в кожний момент часу із урахуванням їх знаку. Вона є симетричною відносно осі часу. Криволінійною віссю симетрії її є крива аперіодичної складової i_a . Після повного затухання останньої (i_a) крива струму к.з. співпадає з його періодичною складовою i_n .

Найбільше миттєве значення струму к.з. за період короткого замикання, яке називається **ударним струмом**, спостерігається по закінченні напівперіоду після замикання, тобто при $t = 0,01$ с. Тоді із виразу (6) отримаємо:

$$i_y = I_{n.\max} \cdot \sin(180^\circ + 0 - 90^\circ) + I_{n.\max} \cdot e^{-\frac{0,01}{T_a}},$$

$$i_y = I_{n.\max} \cdot (1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}) = k_y \cdot I_{n.\max} \quad (7)$$

Ударний коефіцієнт k_y показує, наскільки ударний струм більше максимального значення періодичної складової. Значення ударного коефіцієнту залежить лише від значення сталої часу T_a , яка в свою чергу, залежить від співвідношення коефіцієнта самоіндукції L і активного опору r електричного кола, що розглядається. Відношення L/r теоретично може змінюватися від 0, коли коефіцієнт самоіндукції $L = 0$, до нескінченності, коли активний опір $r = 0$. Ударний коефіцієнт у цих випадках буде змінюватися від одиниці до двох. В реальних електричних мережах максимальне значення ударного коефіцієнта $k_y = 1,8$.

Для сільських електричних мереж, що живляться від потужних енергетичних систем, ударний коефіцієнт необхідно приймати $k_y = 1,8$ у випадку, коли коротке замикання відбувається на шинах нижчої напруги підстанцій із вищою напругою 110 кВ і вище. При к.з. на шинах 35 та 10 кВ підстанцій із вищою напругою 35 кВ $k_y = 1,5$. При к.з. в мережі 10 та 0,38 кВ ударний коефіцієнт $k_y = 1,0$.

Для практичних розрахунків найбільш цікавим є максимальне діюче значення струму к.з. I_y . Під ним розуміють середньоквадратичне значення струму за перший період процесу к.з. Це значення визначають за виразом:

$$I_y = I_n \cdot \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}, \quad (8)$$

де I_n – діюче значення періодичної складової струму к.з.

Всі розглянуті вище міркування справедливі для випадку, коли напруга живлення в процесі короткого замикання залишається незмінною (при живленні від потужних енергосистем).

3 Складання розрахункових та еквівалентних схем мережі

При визначенні струмів короткого замикання використовують один із двох методів:

1. **Метод практичних** (іменованих) одиниць – параметри схеми виражають в іменованих одиницях (омах, амперах, вольтах та ін.);

2. **Метод відносних** одиниць – параметри схеми виражають в частках або відсотках від величини прийнятої в якості основної (базисної).

Метод практичних одиниць застосовують для розрахунку струмів к.з. відносно простих електричних схем із невеликою кількістю ступенів трансформації.

Методом відносних одиниць зручніше користуватися при розрахунку струмів к.з. в складних розгалужених електричних мережах із декількома ступенями трансформації.

Періодичну складову струму к.з. $I_n^{(3)}$ можна визначити будь-яким методом для розрахунку лінійних електричних кіл. На практиці використовують метод еквівалентних перетворень, за допомогою якого еквівалентну схему заміщення зводять до простішого вигляду. Струм в такій схемі, визначений за законом Ома, і є струмом короткого замикання.

При централізованому електропостачанні сільськогосподарських споживачів від потужних енергетичних систем, якщо точка к.з. знаходиться на значному віддаленні від джерела живлення та струм к.з. вважається незмінним у часі і визначається із умови незмінності напруги на шинах системи:

$$I_n^{(3)} = I_k^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z_{pez}}, \quad (9)$$

де z_{pez} – результуючий опір до точки к.з. від шин із незмінною напругою, Ом.

Розрахунок періодичної складової струму к.з. розпочинають із складання для вихідної розрахункової схеми (рисунок 5) її еквівалентної схеми заміщення (рисунок 6). Останню виконують в однолінійному зображенні. Схема заміщення повинна включати всі елементи розрахункової схеми (генератори, трансформатори лінії та ін.), зв'язки між ними і точкою к.з.

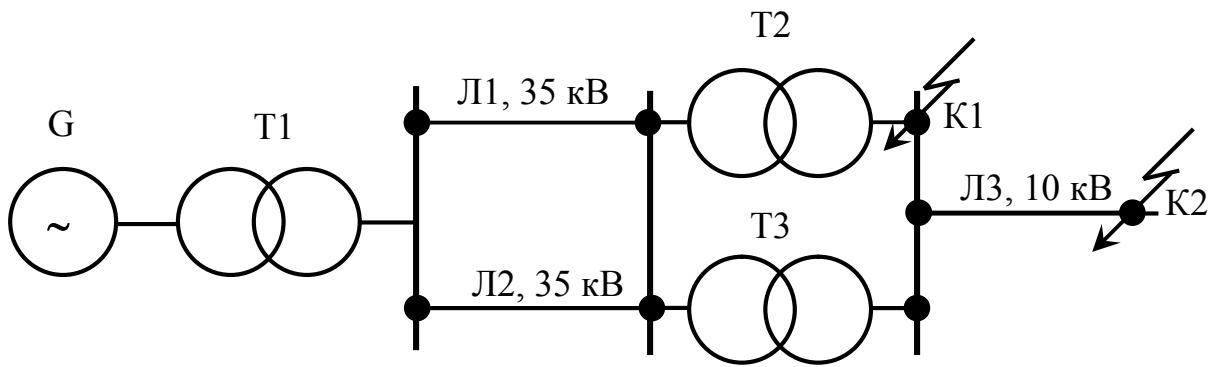
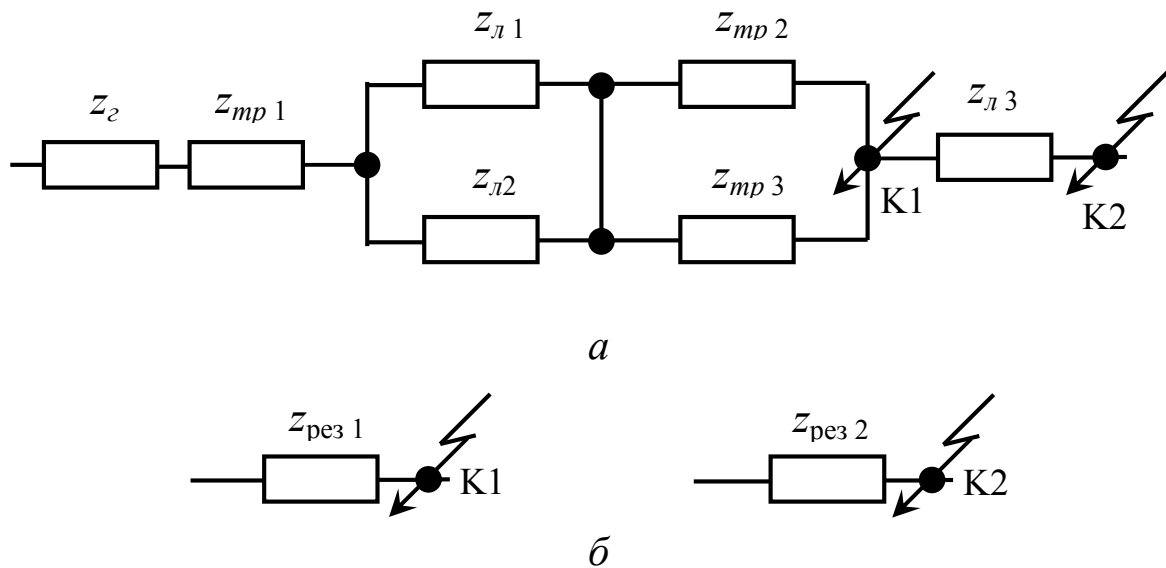


Рисунок 5 – Розрахункова схема мережі



a – повна; *б* – приведена до простішого виду

Рисунок 6 – Еквівалентна схема заміщення мережі

Розрахунок струмів к.з. виконується в наступній послідовності:

- вибирається метод розрахунку та розрахункові умови;
- складається розрахункова схема електричної мережі (рисунок 5);
- за розрахунковою складається еквівалентна схема заміщення (рисунок 6, *a*);
- визначається опір елементів схеми заміщення в практичних (іменованих) або відносних одиницях;
- еквівалентна схема заміщення зводиться до простішого виду (рисунок 6, *б*);
- визначається результуючий опір до точки к.з.;
- визначається значення струмів к.з. в розрахункових точках мережі.

В електроустановках напругою до 1000 В розрахунок струмів к.з. проводиться за повним опором. В електроустановках напругою

понад 1000 В активний опір враховується тільки у випадках, коли виконується умова:

$$r_{рез} \geq \frac{1}{3} \cdot x_{рез}, \quad (10)$$

де $r_{рез}$, $x_{рез}$ – відповідно, активний та реактивний результуючий опір усіх елементів електричної мережі, Ом.

Для нескладних схем величини, що входять до їх складу, можна виражати в іменованих одиницях.

Для мережі яка наведена на рисунку 5 можна виразити кожний елемент відповідним опором z (рисунок 5, а). Для того щоб знайти еквівалентний опір мережі необхідно привести всі опори мережі до однієї напруги, яку називають **базисною**.

За базисну напругу приймають, як правило, напругу того ступеню, де знаходиться точка короткого замикання. Базисна напруга визначається за виразом:

$$U_{\bar{o}} = 1,05 \cdot U_n. \quad (11)$$

Опір елементів електричної мережі в практичних одиницях приведений до базисної напруги визначають за наступними виразами:

– **опір лінії:**

$$r_{л(\bar{o})} = r_o \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\bar{o}}}{U_{с.н}} \right)^2, \quad (12) \quad x_{л(\bar{o})} = x_o \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\bar{o}}}{U_{с.н}} \right)^2, \quad (13)$$

де r_o , x_o – питомі, відповідно, активний та індуктивний опори лінії, Ом/км;

l – довжина лінії, км;

$U_{с.н}$ – середня номінальна напруга ступеня з якого виконується перерахунок, кВ; $U_{с.н} = 1,05 \cdot U_n$;

– **опір трансформатора:**

$$x_{тр(\bar{o})} = \frac{U_{к \%}}{100} \cdot \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{н.тр}}, \quad (14)$$

де U_k – напруга короткого замикання трансформатора, %;
 $S_{нтр}$ – номінальна потужність трансформатора, МВА;

– опір генератора:

$$x_{z(\bar{o})} = x_{*d}'' \cdot \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{н.г}}, \quad (15)$$

де x_{*d}'' – індуктивний опір генератора у відносних одиницях;
 $S_{н.г}$ – номінальна потужність генератора, МВА.

– опір системи:

$$x_{c(\bar{o})} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{к.с}^{(3)}}; \quad (16) \quad x_{c(\bar{o})} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{к.с}^{(3)}}, \quad (17)$$

де $S_{к.с}^{(3)}$ – потужність трифазного к.з. на шинах системи, МВА.
 $I_{к.с}^{(3)}$ – струм трифазного к.з. на шинах системи, кА.

Якщо потужність ($S_{к.с}^{(3)}$) або струм к.з. ($I_{к.с}^{(3)}$) в місці приєднання до енергосистеми не відомі, то за потужність короткого замикання в місці приєднання до системи можна прийняти гранично допустиму потужність, що відключається вимикача, що встановлений у даному місці ($S_{н.відкл}$).

Результуючий опір мережі до точки короткого замикання:

$$z_{рез(\bar{o})} = \sqrt{(\sum r_{(\bar{o})i})^2 + (\sum x_{(\bar{o})i})^2}, \quad (18)$$

Перетворювати складні електричні схеми за допомогою іменованих одиниць не зручно. Тому для складних схем користуються методом відносних одиниць.

В цьому випадку всі величини схеми виражають у відносних одиницях (в частках) від базисних величин. В якості основної базисної величини приймають базисну потужність. Базисна потужність приймається рівною довільному значенню або, для зручності розрахунку, кратною 10 МВА (10, 100, 1000 та ін.).

Базисні величини пов'язані між собою наступними виразами:

$$S_{\bar{o}} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}}, \quad (19) \quad I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} U_{\bar{o}}}; \quad (20)$$

$$z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} I_{\bar{o}}}, \quad (21) \quad z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}}. \quad (22)$$

Опір елементів електричної мережі у відносних одиницях приведений до базисних умов визначають за наступними виразами:

– **опір лінії** :

$$r_{*л(\bar{o})} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2}, \quad (23) \quad x_{*л(\bar{o})} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2}; \quad (24)$$

де $U_{\bar{o}i}$ – базисна напруга i -го ступеню мережі, кВ.

– **опір трансформатора:**

$$x_{*mp(\bar{o})} = \frac{U_{\kappa \%}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{н. mp}}; \quad (25)$$

– **опір генератора:**

$$x_{*z(\bar{o})} = x_{*d}'' \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{н. z}}. \quad (26)$$

– **опір системи:**

$$x_{*c(\bar{o})} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\kappa. c}^{(3)}}; \quad (27) \quad x_{*c(\bar{o})} = \frac{I_{\bar{o}}}{I_{\kappa. c}^{(3)}}. \quad (28)$$

Якщо опір елемента схеми задається в іменованих (практичних) одиницях то перевести його у відносні базисні одиниці можна за виразом:

$$x_{*(\bar{o})} = x \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}, \quad (29)$$

де $S_{\bar{o}}$ – базисна потужність, МВА.

Результуючий опір мережі до точки к.з.:

$$z_{*рез(\bar{o})} = \sqrt{\left(\sum r_{*(\bar{o})i}\right)^2 + \left(\sum x_{*(\bar{o})i}\right)^2}, \quad (30)$$

4 Визначення струмів к.з. в мережах напругою вище 1000 В

При живленні споживачів від системи безмежної потужності, струм трифазного к.з. визначається за наступними виразами:

– у практичних одиницях:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\bar{b}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{рез.(\bar{b})}}, \quad (31)$$

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\bar{b}}}{\sqrt{3} \cdot x_{рез.(\bar{b})}}; \quad (32)$$

– у відносних одиницях:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{I_{\bar{b}}}{Z_{*рез.(\bar{b})}}, \quad (33)$$

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{I_{\bar{b}}}{x_{*рез.(\bar{b})}}. \quad (34)$$

Якщо відома потужність або струм короткого замикання в місці приєднання до системи (система обмеженої потужності), то крім опорів схеми, що розглядалися вище, до схеми заміщення заносять також опір системи (від джерела до місця приєднання сільської електричної мережі).

Ударний струм трифазного к.з. (миттєве значення) визначається за виразом:

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (35)$$

де k_y – ударний коефіцієнт.

– при коротких замиканнях на шинах 35 та 10 кВ підстанцій із напругою вищого ступеня 110 кВ і більше $k_y = 1,8$;

– при к.з. на шинах 35 та 10 кВ підстанцій з вищим ступенем напруги 35 кВ $k_y = 1,5$;

– при к.з. у розподільчих мережах напругою 10 кВ, на шинах споживчих підстанцій і в низьковольтних мережах напругою 0,38/0,22 кВ $k_y = 1$.

Найбільше діюче значення струму трифазного к.з. за перший період визначається за виразом:

$$I_y^{(3)} = I_{\kappa}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2}. \quad (36)$$

Так як для мереж напругою 10 та 0,38 кВ $k_y = 1$, то для таких мереж справедливо, що $I_y^{(3)} = I_\kappa^{(3)}$.

Струм двофазного к.з. (мінімальний струм к.з. в мережах напругою 6...35 кВ):

$$I_\kappa^{(2)} = 0,866 I_\kappa^{(3)}. \quad (37)$$

Потужність трифазного к.з. визначається за наступними виразами:

– у практичних одиницях:

$$S_\kappa^{(3)} = \sqrt{3} \cdot U_\delta \cdot I_\kappa^{(3)}, \quad (38)$$

– у відносних одиницях:

$$S_\kappa^{(3)} = \frac{S_\delta}{Z_{*рез(\delta)}}. \quad (39)$$

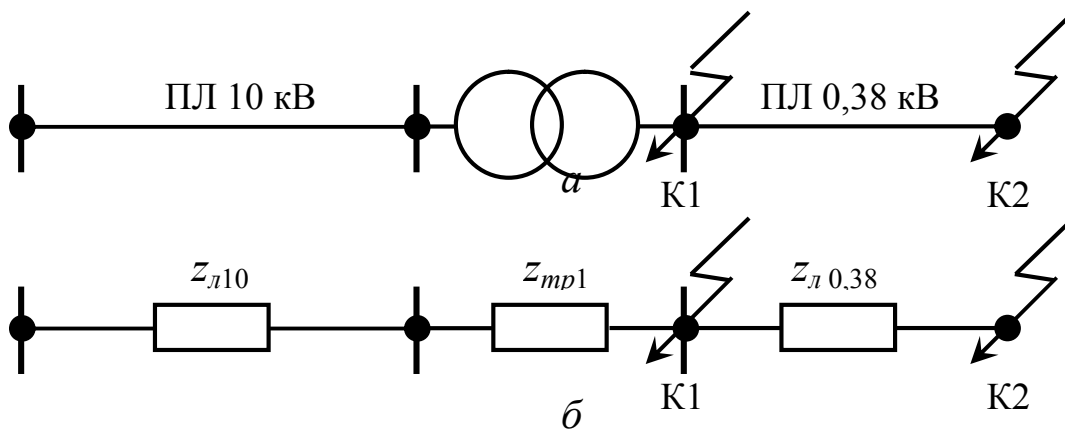
5 Визначення струмів к.з. в мережах напругою до 1000 В

Сільські електричні мережі напругою 380 В виконують із глухо заземленою нейтраллю. В таких мережах можуть виникати трифазні, двофазні та однофазні струми короткого замикання.

Розрахунок струмів к.з. в таких мережах зводиться до визначення максимального струму к.з. (трифазного) на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ та мінімального струму к.з. (однофазного) в найбільш електрично віддаленій точці лінії.

Значення струму трифазного к.з. на шинах підстанції необхідне для: вибору та перевірки електричних апаратів на термічну та динамічну стійкість; узгодження захистів трансформатора та лінії 0,38 кВ. А за струмом однофазного к.з. в найбільш електрично віддаленій точці лінії перевіряють ефективність (чутливість) захисних пристроїв (реле, автоматів, плавких запобіжників).

Аналогічно, як і для мереж напругою вище 1000 В, для розрахункової схеми мережі (рисунок 7, а) складається еквівалентна схема заміщення (рисунок 7, б).



а – розрахункова; *б* – еквівалентна схема заміщення

Рисунок 7 – Схема електричної мережі напругою 0,38 кВ

При визначенні струмів замикання в мережах низької напруги необхідно враховувати як індуктивний, так і активний опори елементів схеми.

У розрахунках не враховують опір лінії 10 кВ, що живить силовий трансформатор ($z_{л10} = 0$), і вважають, що напруга на шинах високої напруги трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ при к.з. в мережі низької напруги залишається незмінною та дорівнює номінальному значенню.

Розрахунок струмів к.з. в мережах низької напруги рекомендується виконувати методом практичних (іменованих) одиниць.

Результуючий опір до точки к.з. складається із активного та індуктивного опорів трансформатора 10/0,4 кВ та лінії 0,38 кВ.

Повний опір трансформатора визначається за виразом (14):

$$Z_{mp(\bar{b})} = \frac{U_{\kappa \%}}{100} \cdot \frac{U_{\bar{b}}^2}{S_{н.тр}}$$

Активний опір трансформатора:

$$r_{mp(\bar{b})} = r_{*mp(н)} \frac{U_{\bar{b}}^2}{S_{н.тр}} = \frac{\Delta P_M}{S_{н.тр}} \cdot \frac{U_{\bar{b}}^2}{S_{н.тр}}, \quad (40)$$

де $r_{*mp(н)}$ – активний опір трансформатора у відносних одиницях;

ΔP_M – втрати потужності в обмотці трансформатора, кВт

Індуктивний опір трансформатора:

$$x_{mp(\bar{o})} = x_{*mp(n)} \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{нmp}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\kappa \%}}{100}\right)^2 - r_{*mp(n)}^2} \cdot \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{нmp}}, \quad (41)$$

або

$$x_{mp(\bar{o})} = \sqrt{z_{mp(\bar{o})}^2 - r_{mp(\bar{o})}^2}.$$

Активний та реактивний опір лінії (12; 13):

$$r_{л(\bar{o})} = r_o \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\bar{o}}}{U_{сн}}\right)^2, \quad x_{л(\bar{o})} = x_o \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\bar{o}}}{U_{сн}}\right)^2.$$

Струм трифазного к.з. в будь-якій точці лінії напругою 0,38 кВ визначається за відомим виразом (31):

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot z_{рез.(\bar{o})}}.$$

Максимальний струм трифазного к.з. на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ визначається за виразом:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{100 \cdot S_{нmp}}{\sqrt{3} \cdot U_{\kappa \%} \cdot U_{\bar{o}}} = \frac{100}{U_{\kappa \%}} \cdot I_{нmp}. \quad (42)$$

Струм однофазного к.з. в лінії 0,38 кВ визначається за виразом:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{mp}^{(1)}}{3} + z_n} = \frac{230}{\frac{z_{mp}^{(1)}}{3} + z_n}, \quad (43)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі, В;

$z_{mp}^{(1)}$ – повний опір трансформатора струму замикання на корпус, Ом;

z_n – повний опір петлі фаза-нуль до точки к.з., Ом.

Опір петлі «фаза-нуль» в загальному випадку визначається за виразом:

$$z_n = \sum l_i \cdot \sqrt{(r_{0\phi.i} + r_{0н.і})^2 + (x_{0\phi.i} + x_{он.і} + x_{0\phi-н.і})^2}, \quad (44)$$

де $r_{0\phi.i}$, $x_{0\phi.i}$ – питомий активний та індуктивний опір i -ї ділянки фазного проводу лінії, Ом/км;

$r_{0н.і}$, $r_{0н.і}$ – питомий активний та індуктивний опір i -ї ділянки нульового проводу, Ом/км;

$x_{0\phi-н.і}$ – питомий зовнішній індуктивний опір петлі фаза-нуль, Ом/км;

l_i – довжина i -ї ділянки лінії, км.

Якщо фазний та нульовий провід лінії виготовлені із кольорового металу, то їхнім індуктивним опором нехтують, тоді:

$$z_n = \sum l_i \cdot \sqrt{(r_{0\phi.i} + r_{0н.і})^2 + x_{0\phi-н.і}^2}. \quad (45)$$

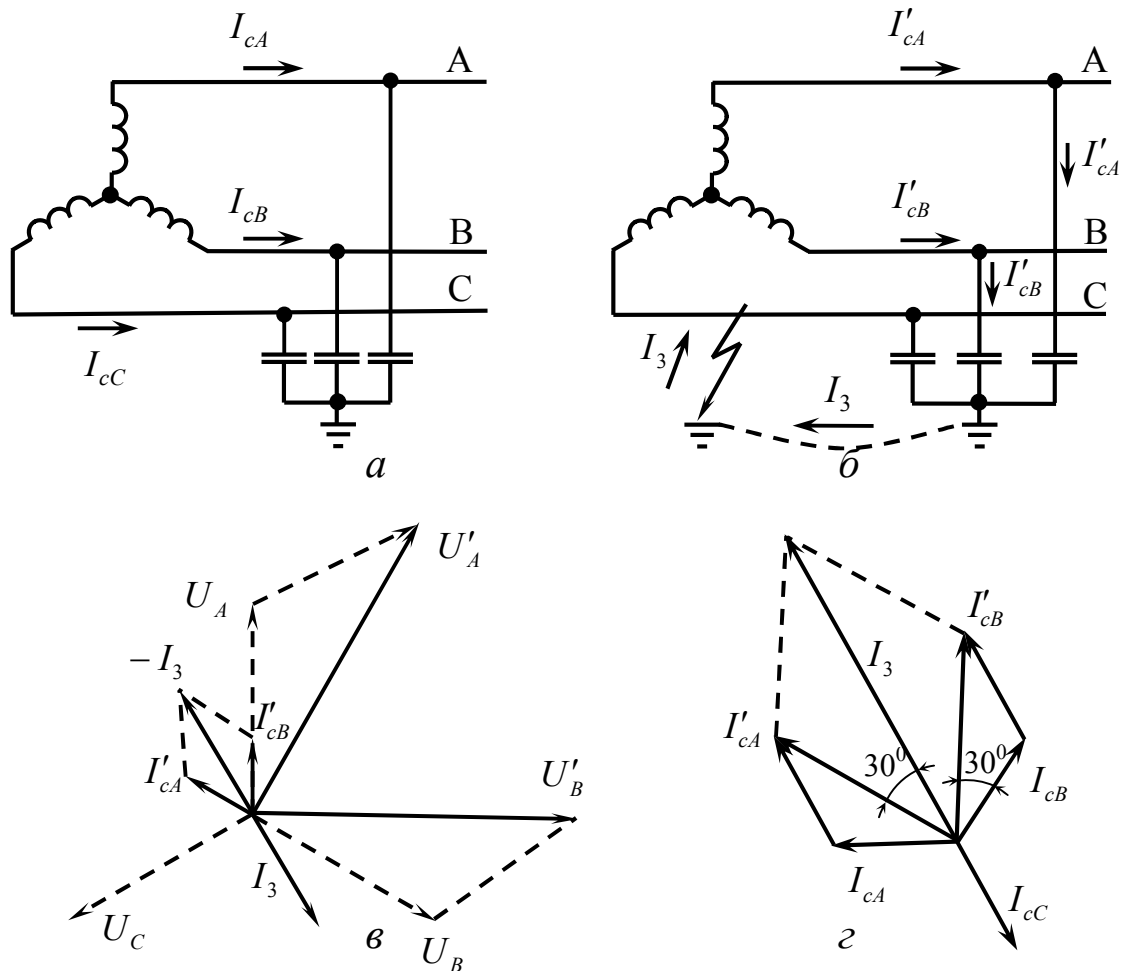
Якщо нульовий провід лінії виконаний таким же перерізом, що і фазний, із кольорового металу, тоді:

$$z_n = \sum l_i \sqrt{(2 \cdot r_{0\phi.i})^2 + x_{0\phi-н.і}^2}. \quad (46)$$

Для проводів з кольорового металу зовнішній індуктивний опір петлі «фаза-нуль» приймається рівним $x_{0\phi-н.і} = 0,6$ Ом/км.

6 Визначення струмів замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю

В електричній мережі з ізольованою нейтраллю (рисунок 8, а) кожна фаза відносно землі має певну ємність, яка рівномірно розподіляється по лінії. Зробимо припущення, що ємність сконцентрована посередині лінії. Перед замиканням лінії на землю (ЗНЗ) напруги і струми в усіх фазах однакові і зсунуті на кут 120° . При відсутності навантаження по лінії проходять лише ємнісні струми I_{cA} , I_{cB} , I_{cC} , які випереджують на 90° відповідні напруги U_A , U_B та U_C .



a – мережа до замикання на землю; *б* – замикання на землю; *в* – векторна діаграма струмів та напруги мережі при замиканні на землю; *г* – векторна діаграма струмів мережі при замиканні на землю

Рисунок 8 – Замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

При замиканні на землю однієї фази всі фази змінюють свій потенціал відносно землі, змінюються і ємнісні струми. Так при замиканні на землю фази *C* (рисунок 8, *б*), якщо перехідний опір в місці замикання дорівнює нулю (металічне замикання) її потенціал відносно землі дорівнює 0, а потенціал непошкоджених фаз відносно землі збільшується у $\sqrt{3}$ разів (до лінійної напруги). Кут зсуву між непошкодженими фазами змінюється до 60° (рисунок 8, *в*). Лінійні напруги при замиканні однієї фази на землю зберігають своє номінальне значення і робота споживачів електроенергії не порушується.

$$I_3 = -(I'_{cA} + I'_{cB}). \quad (47)$$

Оскільки фазні напруги непошкоджених фаз A і B збільшуються в $\sqrt{3}$ разів, ємнісні струми цих фаз також збільшаться в $\sqrt{3}$ разів. Ємнісний струм пошкодженої фази буде дорівнювати нулю. Струм пошкодженої фази буде дорівнювати струму замикання на землю який проходить через точку замикання:

Отже при замиканні однієї фази на землю струм замикання на землю в $\sqrt{3}$ разів більший від ємнісних струмів непошкоджених фаз, які в свою чергу більші в $\sqrt{3}$ разів, ніж ємнісні струми нормального режиму:

$$I_z = 3I_{C_{ном}}. \quad (48)$$

Тобто, у системі з ізольованою нейтраллю струм замикання на землю при металічному замиканні в 3 рази більший, ніж фазний ємнісний струм нормального режиму:

$$I_z = 3U_\phi \omega C, \quad (49)$$

де U_ϕ – номінальна фазна напруга мережі;

ω – кутова частота;

C – ємність фази, залежить від конструкції і довжини лінії.

В практичних розрахунках для визначення струму замикання на землю користуються наступним виразом:

$$I_z \cong \frac{U_n \cdot l}{\mu}, \quad (50)$$

де U_n – номінальна напруга мережі (лінійна), кВ;

l – довжина електрично зв'язаних ліній даного класу напруги, км;

μ – коефіцієнт.

Для повітряних ліній електропередачі $\mu = 350$, а для кабельних – $\mu = 10 \dots 12$.

При однофазних замиканнях на землю в мережі з ізольованою нейтраллю трикутник лінійних напруг не спотворюється, тому споживачі, що ввімкнені на лінійну напругу, продовжують працювати нормально.

Внаслідок того, що при замиканні на землю напруга непошкоджених фаз збільшується в $\sqrt{3}$ разів – ізоляція в таких мережах розраховується на міжфазну напругу. Ця обставина обмежує застосування такого типу мереж лише до напруги 35 кВ, де вартість ізоляції не є визначальною, а її збільшення компенсується безперебійним електропостачанням при замиканнях на землю які становлять 65 % від загальної кількості замикань.

В електричних мережах напругою 6...20 кВ на залізобетонних або сталевих опорах, а також в мережах 35 кВ на опорах будь-якого типу, сила струму замикання на землю не повинна перевищувати 10 А.

Якщо лінії виконані на дерев'яних опорах тоді сила струму замикання на землю не повинна перевищувати: 30 А для ПЛ 6 кВ; 20 А для ПЛ 10 кВ.

Якщо сила струму не перевищує вказаних значень, то при замиканні фази на землю немає необхідності в негайному відключенні лінії, вона може знаходитися в роботі до визначення і ремонту пошкодженого елемента (до 2 годин).

Якщо струм замикання на землю перевищує вказані значення, то може виникнути електрична дуга що перемещується. Це в свою чергу веде до виникнення перенапруги, яка представляє небезпеку для ізоляції, особливо в мережах напругою 35 кВ.

Для зменшення струму замикання на землю, який має ємнісний характер, між нейтраллю трансформатора та землею встановлюють дугогасильну індуктивну котушку (реактор). Такі мережі називаються компенсованими. Для повітряних ліній це мережі напругою 35 кВ, а для кабельних ліній – 6...35 кВ.

Якщо сила струму замикання на землю перевищує 50 А рекомендується встановлювати не менше двох дугогасильних реакторів.

Запитання для самоконтролю

1. Які причини виникнення коротких замикань?
2. Які наслідки виникнення струмів к.з. в мережі?
3. Які є види коротких замикань?
4. З якою метою розраховують струми к.з. в електричних мережах?
5. Що таке ударний струм к.з. і коли він з'являється?
6. Що показує ударний коефіцієнт і які значення він може приймати?
7. Які існують методи розрахунку струмів к.з.?
8. В яких випадках для розрахунку струмів к.з. використовують метод іменованих (практичних) одиниць?
9. В яких випадках для розрахунку струмів к.з. використовують метод відносних (умовних) одиниць?
10. Що таке розрахункова схема мережі?
11. Що таке еквівалентна схема мережі?
12. Як враховується активний опір елементів мережі при розрахунку струмів к.з.?
13. Як визначаються опори окремих елементів мережі?
14. Що таке опір петлі «фаза-нуль»?
15. З якою метою розраховують однофазний струм к.з. в мережі напругою 0,38 кВ?
16. Що таке струм замикання на землю?
17. Як змінюється фазна напруга на непошкоджених фазах мережі 10 кВ при замиканні однієї фази на землю?
18. Як визначається струм замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю?
19. З якою метою і коли використовують дугогасильні реактори в мережах з ізольованою нейтраллю?