

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

1. Види, причини та наслідки коротких замикань

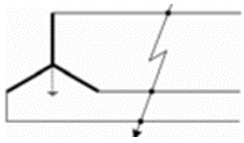
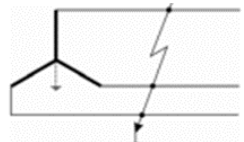
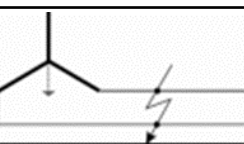
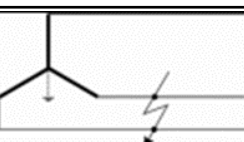
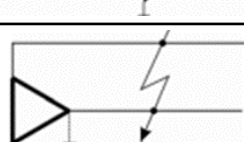
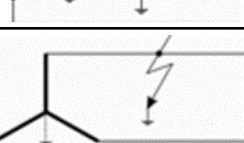
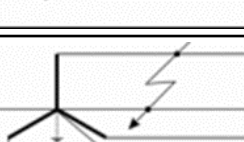
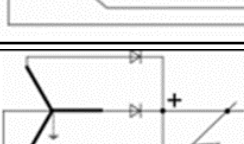
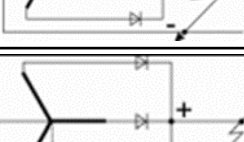
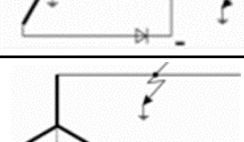
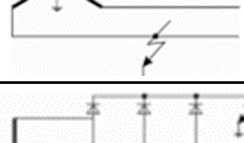
Випадкове або навмисне, не передбачене нормальним режимом роботи, електричне з'єднання фаз (полюсів) струмоведучих кіл електроустановки між собою або з землею, при якому струми різко зростають, перевищуючи найбільш допустимий струм усталеного режиму, в колах, що примикають до місця виникнення цього з'єднання, називається коротким замиканням чи замиканням у випадках з'єднання з землею однієї фази (полюса) електроустановки, елементи якої працюють з ізольованою або резонансно заземленою нейтраллю.

В умовах експлуатації СЕП серед основних причин виникнення перехідних процесів – це переважно короткі замикання, які суттєво порушують нормальний режим роботи електроустановок. Тому при проектуванні СЕП короткі замикання розглядають як характерні збурення, що зумовлюють перехідні електромагнітні процеси.

В електроустановках залежно від класифікаційних ознак електричних мереж (напруга, вид струму, кількість фаз чи полюсів, стан нейтралі або середньої точки тощо) необхідно розрізняти такі види коротких замикань (табл. 1):

- трифазне КЗ – між трьома фазами в трифазній електричній мережі змінного струму;
- трифазне КЗ на землю – на землю або нульовий провід у трифазній електричній мережі змінного струму з глухозаземленими або ефективно заземленими нейтраллями силових елементів, коли з'єднуються між собою та із землею три фази;
- трифазне КЗ із землею виникає в трифазній мережі змінного струму з ізольованими або резонансно заземленими нейтраллями силових елементів, коли місце замикання трьох фаз контактує з землею;
- двофазне КЗ – замикання між двома фазами в трифазній електричній мережі змінного струму;

Види коротких замикань в електроустановках

Пояснювальна схема	Стан нейтралі (середньої точки, виводу)			
	глухо (ефективно) заземлена		ізольована (резонансно заземлена)	
	назва	позначення	назва	позначення
	Трифазне КЗ	$K^{(3)}$	Трифазне КЗ	$K^{(3)}$
	Трифазне КЗ на землю	$K^{(1,1,1)}$	Трифазне КЗ із землею (контакт із землею)	$K^{(3з)}$
	Двофазне КЗ	$K^{(2)}$	Двофазне КЗ	$K^{(2)}$
	Двофазне КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	Двофазне КЗ із землею (контакт із землею)	$K^{(2з)}$
	Двофазне КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	-	-
	Однофазне КЗ на землю	$K^{(1)}$	Однофазне замикання на землю	$K^{(з)}$
	Однофазне КЗ на землю	$K^{(1)}$	Однофазне КЗ	$K^{(1)}$
	Двополюсне КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	Двополюсне КЗ	$K^{(2)}$
	Однополюсне КЗ на землю	$K^{(1)}$	Одноволюсне замикання на землю	$З^{(1)}$
	Подвійне КЗ на землю	$K^{(1+1)}$	Подвійне замикання на землю	$З^{(1+1)}$
	-	-	Подвійне замикання на землю	$З^{(1+1)}$

- **двофазне КЗ на землю** виникає між двома фазами, коли фази з'єднуються з землею, в трифазній електричній мережі з глухозаземленими та ефективно заземленими нейтраліями силових елементів, у двофазній тяговій мережі змінного струму, де одна фаза ввімкнена до контактної мережі, а інша заземлена до рейкового кола;
- **двофазне КЗ з землею** – це замикання двох фаз у трифазній електричній мережі змінного струму з ізолюваними або резонансно заземленими нейтраліями силових елементів, що має зв'язок з землею;
- **однофазне КЗ на землю** – це замикання однієї фази з землею чи заземленим нульовим проводом у три- або однофазній електричній мережі змінного струму з глухозаземленими (ефективно заземленими) нейтраліями силових елементів;
- **однофазне КЗ** – це замикання фази з нульовим проводом в однофазній електричній мережі змінного струму з ізолюваною або резонансно заземленою нейтраллю (виводом);
- **однофазне замикання з землею** – це з'єднання фази з землею в три- або однофазній (з нульовим проводом) електричній мережі змінного струму з ізолюваними чи резонансно заземленими нейтраліями (виводами) силових елементів;
- **двополюсне КЗ на землю** виникає в мережі постійного (випрямленого) струму з заземленою середньою точкою джерела струму, коли місце замикання полюсів з'єднується з землею;
- **двополюсне КЗ** – це замикання полюсів у мережі постійного (випрямленого) струму з ізолюваною середньою точкою джерела струму;
- **однополюсне КЗ на землю** – це замикання ізолюваного полюса на землю в мережі постійного (випрямленого) струму з заземленою середньою точкою джерела струму;
- **однополюсне замикання з землею** має місце в мережі постійного струму з ізолюваною середньою точкою, коли один з полюсів з'єднується з землею;
- **подвійне КЗ на землю** – це сукупність двох однофазних коротких замикань на землю в різних, але електрично зв'язаних частинах електроустановки;
- **подвійне замикання з землею** – це сукупність двох однофазних (однополюсних) замикань на землю в різних, але електрично пов'язаних частинах електроустановки.

За характером проходження КЗ поділяють на симетричні та несиметричні, стійкі та нестійкі, видозмінні. При симетричному КЗ усі три фази електроустановки перебувають в однакових умовах. Якщо при КЗ хоч одна з фаз різнитиметься від умов інших фаз, то його називають

несиметричним КЗ. До стійких КЗ в електроустановках зараховують такі, які зберігаються і після безструмової паузи комутаційного апарата. До нестійких КЗ належать такі з них, поява яких самоліквідується за безструмової паузи комутаційного електричного апарата, який розмикає коло перебігу струму КЗ. Видозмінним КЗ називають замикання в електроустановці з переходом одного виду КЗ в інший.

За місцем виникнення в елементах СЕП розрізняють:

- міжвіткове КЗ – між вітками обмотки однієї фази;
- міжкотушкове або міжсекційне КЗ – між котушками або секціями обмотки однієї фази;
- міжвіткове КЗ – між різними витками однієї котушки, обмотки трансформатора, електричної машини.

За основними видами відносний розподіл КЗ в електричних мережах такий: $K^{(3)} \approx 5$, $K^{(2)} \approx 10$, $K^{(1,1)} \approx 65$, $K^{(1,1)}$ та $K^{(1+1)} \approx 20\%$. Статистичні дослідження свідчать про те, що питома частота різних видів КЗ залежить від напруги мережі (табл. 2). За причинами виникнення розрізняють навмисні та випадкові КЗ. Навмисні КЗ – це, власне, робочий момент у функціонуванні технологічного обладнання (електрозварювальні агрегати, електродугові печі і т. ін.) та електротехнічних пристроїв (повітряні розрядники, коротковмикачі, комутаційні апарати з примусовим гашенням дуги).

Таблиця 2

Відносна частота різних видів КЗ залежно від рівня напруги мережі

Вид КЗ	Відносна частота КЗ (%) у мережах напругою (кВ)					
	6-20 (розподільна мережа)	6-20 (мережа блоків)	35	110	220	330
$K^{(1)}$	61	60	67	83	88	91
$K^{(2)}$	17	20	18	5	3	4
$K^{(1,1)}$	11	15	7	8	7	4
$K^{(3)}$	11	5	8	4	2	1

Випадкові КЗ виникають в результаті порушення ізоляції електроустановок внаслідок втрати властивостей ізоляції в процесі експлуатації електроустаткування; перенапруг; прямих ударів блискавок; механічних пошкоджень; накидів сторонніх предметів на струмоведучі частини; незадовільного догляду за електроустаткуванням; помилкової дії обслуговуючого персоналу.

При КЗ можуть траплятися різні небезпечні наслідки.

- недопустиме нагрівання електроустаткування та його термічне пошкодження через значне зростання струмів (у 10...15 разів і більше);
- виникнення великих механічних зусиль між струмоведучими частинами, які призводять до їх пошкодження або руйнування;
- зниження напруги та спотворення її фазної симетрії, що негативно впливає на роботу споживачів енергії. Так, при зниженні напруги на 30...40 % протягом не менше секунди розпочинається процес гальмування електродвигунів, внаслідок чого можливі порушення технологічного циклу на підприємствах, поява браку продукції та інші відхилення, пов'язані з народногосподарськими втратами;
- наведення при несиметричних КЗ в сусідніх лініях зв'язку та сигналізації е.р.с., небезпечних для обслуговуючого персоналу і апаратури;
- порушення стійкості роботи окремих елементів та режиму СЕП у цілому, що призводить до аварійних ситуацій з вимкненням значної кількості споживачів електричної енергії;
- спалахування електроустановок.

Найбільш небезпечні наслідки виявляються звичайно в силових елементах, що прилягають до місця виникнення КЗ. Якщо КЗ на значній електричній віддалі від джерела живлення, то збільшення струму сприймається генераторами як деяке підвищення навантаження. Суттєве зниження напруги відбувається лише поблизу місця трифазного КЗ.

Щоб забезпечити безперебійне електропостачання всіх споживачів, необхідно проектувати та споруджувати СЕП з урахуванням можливих КЗ, суворо дотримуючись правил експлуатації електроустановок, безперервно підвищуючи технічний рівень і якість виготовлення електроустаткування. У СЕП для вилучення небезпечних наслідків від КЗ та забезпечення стійкості режиму роботи навантаження вводять швидкодіючі засоби захисту важливих елементів, застосовують спеціальні схеми автоматичного вмикання резерву джерел живлення, передбачають розподіл у часі процесів самозапуску різних груп двигунів, встановлюють регульовальні пристрої збудження синхронних машин.

2. Призначення розрахунків електромагнітних перехідних процесів, розрахункові умови

Розрахунок електромагнітних перехідних процесів в СЕП при коротких замиканнях, як найбільш характерних збудженнях, має важливе значення для проектування та експлуатації. Такий розрахунок передбачає обчислення значень напруг, струму та інших параметрів режиму КЗ у точці виникнення КЗ або в інших точках СЕП чи вітках мережі при заданих умовах.

Розрахунки режиму КЗ необхідні для вирішення таких завдань:

- виявлення умов роботи споживачів енергії при можливих КЗ та допустимості того чи іншого режиму;
- вибір та перевірка електроустаткування за умовами КЗ;
- проектування і налагодження засобів захисту та системної автоматики, вибір запобіжних пристроїв автоматичних комутаційних апаратів;
- зіставлення, оцінка та вибір схем електричних з'єднань СЕП;
- координація і оптимізація значень струмів та потужності КЗ;
- оцінка стійкості режиму СЕП та її вузлів навантаження;
- проектування заземлювальних пристроїв;
- визначення впливу струмів КЗ на лінії зв'язку;
- вибір розрядників для захисту електроустановок від перенапруги;
- аналіз аварій в електроустановках;
- проведення різних випробувань у СЕП.

Відповідно до цільового призначення розрахунку встановлюють розрахункові умови короткого замикання для аналізованого елемента СЕП, якими керуються в обчисленні значень параметрів режиму КЗ за певних моментів часу або їх змін протягом перехідного процесу.

Розрахункові умови КЗ – найбільш складні, але достатньо важливі, в яких може опинитися елемент електроустановки через різні види коротких замикань. До сукупності первинних характеристик розрахункових умов входять розрахункові: схема, вид струму КЗ, а також точка (місце), вид і тривалість КЗ.

Розрахункова схема електроустановки – це схема з'єднань елементів СЕП, де існують розрахункові умови КЗ для елемента, що розглядається, або іншого завдання. При виборі розрахункової схеми слід урахувати передбачені для даної електроустановки умови її усталеної роботи і не зважати на короткочасні зміни схеми, не передбачені для сталої експлуатації (наприклад, під час перемикань). Короткочасних змін схеми не стосуються пов'язані з переходом на ремонтні чи післяаварійні режими роботи СЕП. Складання розрахункової схеми повинне передбачати перспективу розвитку зовнішніх мереж та генеруючих джерел (не менше п'яти років від запланованого терміну введення в експлуатацію), з якими електрично з'єднана СЕП.

Розрахунковий струм КЗ слід визначати за обставин можливого пошкодження в такій точці мережі, коли при КЗ апарати та провідники мережі або системи захисту від цього пошкодження перебувають в найбільш важких або граничних за чутливістю умовах. На випадки одночасного замикання на землю різних фаз в двох різних точках схеми можна не зважати, якщо це не окреме завдання.

Розрахункова точка (місце) КЗ – це точка (вітка) електроустановки, при перебігу струму КЗ в якій для елемента СЕП справедливі розрахункові умови КЗ.

Розрахунковий вид КЗ – це такий, при якому існують розрахункові умови КЗ для розглядуваного елемента СЕП. За розрахунковий вид КЗ необхідно брати:

- трифазне КЗ – у визначенні термічної стійкості апаратів та провідників на всіх ступенях напруги, окрім живлення генераторною напругою;
- три- або двофазне КЗ (залежно від того, яке з них призводить до більшого нагрівання) – у визначенні термічної стійкості апаратів та провідників ступені генераторної напруги;
- трифазне КЗ – у визначенні електродинамічної стійкості апаратів і жорстких шин з підтримуючими та опорними конструкціями, що до них належать;
- три- і однофазне КЗ на землю – для вибору апаратів за комутаційними властивостями.

Розрахункова тривалість КЗ встановлюється за допустимою дією на елемент СЕП струмів КЗ. Наприклад, при розрахунку термічної стійкості як розрахунковий слід брати підсумковий час, отриманий від складання терміну дії основного захисту найближчого до місця КЗ (з урахуванням АПВ) та повного часу дії вимикача (включаючи час горіння дуги). При наявності зони нечутливості в основного захисту (за струмом, напругою, опором і т.п.) термічну стійкість необхідно додатково перевіряти відповідно до суми часу дії резервного захисту, що реагує на пошкодження в цій зоні, і часу дії вимикача. При цьому за розрахункове треба взяти значення струму, яке відповідає місцю КЗ.

Точність обчислення параметрів режиму КЗ залежить від цільового призначення розрахунку. Так, для вибору та перевірки електричних апаратів точність розрахунків може бути меншою, аніж при виборі засобів захисту і автоматики. В останньому випадку необхідно визначити (залежно від мети) найбільші чи найменші значення струмів та напруг, можливий зсув між ними в окремих фазах або між їхніми симетричними складовими, врахувати опір електричної дуги тощо.

3. Початкові положення до розрахунку струмів короткого замикання

Для СЕП потужних підприємств урахування явищ, що характеризують процес КЗ, для розрахунку параметрів режиму – справа трудомістка. Точне визначення струмів та напруг КЗ являє собою громіздке завдання, розв'язуване з використанням методів розрахунку, орієнтованих на застосування засобів обчислювальної техніки.

Для вирішення більшості практичних завдань проектування та експлуатації СЕП допустима деяка похибка у визначенні струмів КЗ, значення якої необхідно співвідносити з цільовим призначенням розрахунку. Тому

можливе введення низки обмежень та припущень, що ідеалізують та спрощують опис процесу КЗ і дають змогу використовувати уточнені або спрощені методи розрахунку.

В уточнених методах розрахунку струмів КЗ (наприклад, для проектування засобів захисту та системної автоматики) доцільно враховувати такі основні чинники:

а) для початкового моменту часу виникнення КЗ $t = 0$ – е.р.с. синхронних генераторів та компенсаторів брати рівними за модулем і кутом значенню е.р.с. за їх надперехідним опором у попередньому навантажувальному режимі (надперехідні е.р.с.); для довільного моменту часу процесу КЗ ($t > 0$) – оцінювати зміну е.р.с. за модулем та кутом з урахуванням впливу АРЗ;

б) комплексні опори силових елементів розрахункової схеми СЕП (реактивні та активні складові), беручи їх лінійними, а також активні опори струмообмежувальних резисторів, увімкнених в нейтралі силових трансформаторів;

в) комплексний характер навантаження;

г) взаємоіндукцію між паралельними лініями електропередач у схемах нульової послідовності;

д) поперечну ємнісну провідність ліній електромереж напругою 330–750 кВ завдовжки не менше 150 км і напругою 110–220 кВ завдовжки понад 200...250 км.

У спрощених методах розрахунку вищеназвані чинники повною мірою можна не враховувати. Такі методи розрахунку струмів КЗ застосовують для вибору і перевірки електроустаткування за умовами КЗ, якщо їхня похибка не перевищує 5...10 %. В електроустановках напругою вище 1 кВ при розрахунку струмів КЗ для вибору апаратів чи провідників та визначення впливу на несучі конструкції виходять з названого далі:

- джерела, використані в живленні місця КЗ, працюють одночасно, з номінальним навантаженням;
- синхронні машини мають автоматичні регулятори напруги чи пристрої для форсування збудження;
- коротке замикання настає в такий момент часу, коли струм КЗ – з найбільшим значенням;
- електрорушійні сили всіх джерел живлення збігаються за кутом і зміни частоти обертання роторів синхронних машин не враховують, якщо тривалість КЗ не перевищить 0,5 с;
- розрахункова напруга кожного ступеня СЕП береться на 5% вищою номінальної напруги;

- повинен враховуватися вплив на струми КЗ приєднаних до даного місця мережі синхронних компенсаторів, а також синхронних і асинхронних двигунів, що перейшли на генераторний режим роботи. На вплив асинхронних двигунів не зважають при їх одиничній потужності до 100 кВт і якщо двигуни віддалені від місця КЗ одним ступенем трансформації, а також при будь-якій потужності, коли вони віддалені від місця КЗ двома і більше ступенями трансформації або струм від них може надходити до місця КЗ лише через ті елементи, якими перебігає основний струм КЗ від джерела мережі й які мають суттєвий опір (лінії електропередачі, реактори, трансформатори і т. ін.);
- не враховують насичення магнітних систем усіх елементів контуру живлення КЗ (генератори, трансформатори, електродвигуни);
- нехтують активними складовими опорів елементів схеми, якщо відношення складових опорів від джерела живлення до точки КЗ $r_{\text{рез}}/x_{\text{рез}} \leq 1/3$. Активні складові сумарних опорів беруть до уваги лише при визначенні міри затухання аперіодичних складових струмів КЗ;
- не враховують ємнісних провідностей на землю повітряних ліній напругою до 220 кВ (для кабельних ліній напругою 110 кВ і вище ємнісні провідності необхідно враховувати);
- вважають, що всі елементи СЕП симетричні, а порушення симетрії відбувається лише в місці КЗ;
- наближено враховують затухання аперіодичної складової струму КЗ у схемах з кількома незалежними контурами;
- не зважають на вплив живлення від комплексного навантаження, якщо струм у місці КЗ складе від останнього менше 5% струму КЗ, визначеного без урахування навантаження;
- не враховують різницю значень надперехідних індуктивних опорів (поздовжня та поперечна осі) синхронних машин;
- нехтують струмами віток намагнічування трансформаторів та автотрансформаторів;
- не враховують підживлення місця КЗ від двигунів ступеня напруги до 1 кВ при розрахунку струмів КЗ у мережі вищою напругою.

В електроустановках напругою понад 1 кВ як розрахункові можна брати тільки індуктивні складові опорів електричних машин, силових трансформаторів та автотрансформаторів, реакторів, повітряних і кабельних ліній, а також струмопроводів. Активні складові опорів слід враховувати лише для ПЛ з проводом малого перетину чи сталевими проводами, а також для протяжних кабельних ліній малого перетину з порівняно великим активним опором. Електроустановки напругою до 1 кВ – в основному розподільні, розгалужені, із значною кількістю силових елементів, апаратів контролю та

керування. Як правило, вони живляться від одного потужного джерела. Тому при живленні електроустановок напругою до 1 кВ від знижувальних трансформаторів у розрахунку струмів КЗ необхідно виходити з того, що напруга, підведена до трансформатора, незмінна за амплітудою і дорівнює номінальному значенню.

Електроустановки напругою до 1 кВ – в основному розподільні, розгалужені, із значною кількістю силових елементів, апаратів контролю та керування. Як правило, вони живляться від одного потужного джерела. Тому при живленні електроустановок напругою до 1 кВ від знижувальних трансформаторів у розрахунку струмів КЗ необхідно виходити з того, що напруга, підведена до трансформатора, незмінна за амплітудою і дорівнює номінальному значенню.

Розрахунки струмів КЗ у цих мережах виконують з тими ж припущеннями, що і в мережах напругою понад 1 кВ, але з урахуванням активних складових опорів силових елементів мережі. У розрахунковій схемі короткозамкненого контуру треба враховувати:

- 1) активні та індуктивні складові опорів усіх елементів короткозамкненого контуру, включаючи провідники та струмоведучі частини розподільних пристроїв, трансформатори струму, струмові котушки автоматичних вимикачів;
- 2) активні опори перехідних контактів та контактних з'єднань у контурі перебігу струму КЗ;
- 3) перехідний опір електричної дуги в місці КЗ;
- 4) значення параметрів режиму роботи синхронних та асинхронних двигунів, що перейшли на генераторний режим роботи.

При цьому рекомендується зважати на:

- вплив комплексного навантаження (двигуни, перетворювачі, термічні установки, електричні лампи) на сумарний струм КЗ, якщо номінальний струм двигунів навантаження перевищує 10 % від початкового значення періодичної складової струму КЗ основного джерела;
- зміну значень активних опорів елементів та провідників короткозамкненого контуру внаслідок їх нагрівання струмом КЗ;
- вплив конденсаторних батарей в підживленні місця КЗ при розрахунку струмів КЗ для вибору запобіжників.

Допускається нехтувати складовою опору (активною або реактивною), якщо повний опір контуру перебігу струму КЗ зменшується при цьому не більш як на 10 %.

4. Розрахункова схема системи електропостачання

Розрахункова схема для аналізу аварійного режиму з КЗ складається на основі принципової схеми СЕП в однолінійному зображенні. Принципова схема повинна відповідати схемі електричних з'єднань елементів СЕП для умов нормальної експлуатації з найбільшою кількістю ввімкнених джерел живлення. До розрахункової схеми вводять лише ті елементи СЕП, що в аварійному режимі – як генеруючі джерела або з властивостями електричного опору в колі перебігу струму КЗ. Тобто в ній показують: джерела живлення СЕП (генератори, синхронні компенсатори, статичні джерела реактивної потужності; можливі, у разі переходу на генераторний режим, місцеві джерела живлення (узагальнене навантаження, двигуни); точки КЗ; силові трансформатори, реактори, повітряні та кабельні лінії електромереж, що пов'язують джерела живлення з точками КЗ. У розрахунковій схемі ще подається опис елементів через їх паспортні, номінальні показники в обсязі, необхідному для розрахунків.

Залежно від завдання на розрахунковій схемі можна позначати декілька точок та видів КЗ. Кінцева мета – визначення як найбільших (для перевірки електроустаткування на стійкість до дії струмів КЗ), так і найменших (для перевірки релейного захисту) значень аварійних струмів, а також залишкових напруг у вузлах мережі. Тому за станом складання розрахункової схеми для обчислення відповідних значень параметрів розрахункового аварійного режиму з'ясовують і розрахункові умови (місце розміщення точки, вид та передбачувана розрахункова тривалість КЗ). Аварійному режимові надається смислове значення відповідно до кінцевої мети розрахунку струму КЗ. Розрахункові умови режиму визначають з урахуванням розвитку мережі.

Кожен елемент розрахункової схеми характеризується наведеним нижче складом паспортних показників визначення, необхідних для обчислення параметрів режиму з КЗ.

У синхронних машин (електрична система обмеженої потужності, генератор, компенсатор, синхронний двигун) – такі типові показники: номінальні повна S_H (МВ*А) або її активна складова P_H (МВт) потужності, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_H$ і напруга U_H (кВ); опори, відповідно, поздовжньою та поперечною осями: надперехідні – x''_{*d} і x''_{*q} , перехідні – x'_{*d} і x'_{*q} , синхронні x_{*d} і x_{*q} ; опори розсіяння обмотки статора $x_{*\sigma}$; опори зворотної послідовності x_{*2} ; активна R_f та індуктивна x_{*f} складові опору обмотки збудження (Ом); активна R_{1d} та індуктивна x_{*1d} складові опору поздовжньої демпферної обмотки; активна R_{1q} (Ом) та індуктивна x_{*1q} складові опору поперечної демпферної обмотки; струм збудження граничний $I_{f\text{ гр}}$ (А), а при

роботі в режимі неробочого ходу з номінальною напругою – I_{f0} (А); постійні часу затухання аперіодичної складової струму статора при трифазному $T_a^{(3)}$ і однофазному $T_a^{(1)}$ КЗ на затискачах машини, с; напруга $U_{\phi(0)}$ (кВ), струм статора $I_{(0)}$ (А) і коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{(0)}$ у момент часу до появи КЗ; коефіцієнт корисної дії двигунів η (%).

Якщо СЕП живиться від потужної ЕЕС, то зв'язок з нею може визначатися струмом або потужністю КЗ на приймальних шинах. Відсутність цих даних призводить до того, що наближену оцінку такого зв'язку виконують за номінальним струмом вимикання вимикачів, встановлених на шинах зв'язку з ЕЕС. Припускають, що струм (потужність) трифазного КЗ безпосередньо за вимикачем дорівнює відповідно його номінальному струмові вимикання $I_{\text{вим.н}}$ або номінальній потужності вимикання $S_{\text{вим.н}}$ при заданій напрузі. На основі цих параметрів і знаходять еквівалентний опір системи.

Асинхронний двигун характеризується номінальними потужністю S_n (МВт), напругою U_n (кВ), коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_n$; кратністю пускового струму $I_{*\text{пуск}}$; номінальним ковзанням s_n (%); кратністю максимального моменту відносно номінального моменту $M_{*\text{max}}$; опором статора постійному струму R (Ом); напругою $U_{\phi(0)}$ (кВ), струмом I_0 (кА) і коефіцієнтом потужності $\cos \varphi(0)$ в момент часу до появи КЗ.

Для силових трансформаторів та автотрансформаторів властива група показників: номінальна потужність S_n (МВА); номінальні напруги обмоток U_{B_n} , U_{C_n} і U_{H_n} (кВ); фактичні коефіцієнти трансформації n ; напруга короткого замикання між парами обмоток u_{KB-H} , u_{KB-C} , u_{KC-H} (%) та їх залежність від коефіцієнтів трансформації; діапазон регулювання напруги, що визначає напругу короткого замикання в умовах КЗ (%); втрата активної потужності короткого замикання в обмотках ΔP_{KB-H} , ΔP_{KB-C} , ΔP_{KC-H} або в трансформаторі ΔP_k (кВт); схема та група з'єднання обмоток.

Реакторіві притаманні: номінальна напруга U_n (кВ); номінальний індуктивний опір x_n (Ом або %); коефіцієнт зв'язку $k_{зв}$ (для здвоєного реактора); номінальний струм I_n (А); номінальні втрати потужності ΔP_n (кВт) або відношення x_n/r .

Повітряні лінії на розрахункових схемах відзначаються: кількістю паралельних ланцюгів; довжиною лінії l (км); індуктивним опором прямої

послідовності x_1 і нульової послідовності x_0 (Ом/км); активним опором прямої послідовності r_1 (Ом/км) або відношенням x_1/r_1 ; активним опором нульової послідовності r_0 (Ом/км). Значення опорів x_1 і r_1 подаються у довідниках залежно від марки проводу і значення середньої геометричної відстані між проводами. Середні розрахункові значення x_1 складають 0,4 Ом/км для повітряних ліній напругою 6- 220 кВ; 0,33 Ом/км для ПЛ напругою 330 кВ (два проводи на фазу) і 0,3 Ом/км для ПЛ напругою 500 кВ (три проводи на фазу). Опір x_0 залежить від перетину проводів, відстані між фазами, наявності або відсутності заземлених тросів та сусідніх паралельних ланцюгів.

Кабельні лінії задаються довжиною l (км), кількістю кабелів на лінії, індуктивним опором прямої послідовності x_1 і нульової послідовності x_0 (Ом/км), активним опором прямої послідовності r_1 та нульової послідовності r_0 (Ом/км). Значення опорів КЛ залежать від типу кабелю і змінюються в широких межах. Середні значення x_1 дорівнюють: 0,12 Ом/км – для трижильних КЛ напругою 35 кВ; 0,08 Ом/км – для КЛ напругою 6 і 10 кВ; 0,07 Ом/км – для КЛ напругою 3 кВ. Значення опорів x_0 і r_0 залежать від способу прокладання кабелів та їх типів. У випадках трижильних КЛ наближено можна вважати, що $x_0 = (3, 5, \dots, 4, 6) = x_1$.

Комплексне навантаження має показники конкретних електроспоживачів: повну потужність S_n МВ*А; коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n$ і напругу живлення U_n , кВ. У наближених розрахунках допускається еквівалентність комплексного навантаження з її поданням як узагальнене навантаження з еквівалентними е.р.с. та опором. Рекомендовані значення опорів прямої та зворотної послідовностей елементів комплексних навантажень наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Характеристика елементів комплексних навантажень

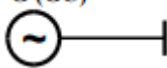
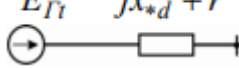
Елемент комплексного навантаження	$\cos \varphi_n$	Опір, відн. од.	
		прямої послідовності $\underline{z}_{1н}$	зворотної послідовності $\underline{z}_{2н}$
Синхронні двигуни високовольтні	0,9	$0,04 + j \cdot 0,22$	$0,04 + j \cdot 0,22$
Асинхронні двигуни високовольтні	0,9	$0,06 + j \cdot 0,18$	$0,06 + j \cdot 0,18$
Асинхронні двигуни низьковольтні	0,8	$0,09 + j \cdot 0,154$	$0,09 + j \cdot 0,154$
Електричні лампи	1,0	1,0	1,13
Газорозрядні джерела світла	0,85	$0,85 + j \cdot 0,53$	$0,382 + j \cdot 0,24$
Перетворювачі	0,9	$0,9 + j \cdot 0,44$	$1,66 + j \cdot 0,814$
Електротермічні установки	0,9	$1,0 + j \cdot 0,49$	$0,4 + j \cdot 0,196$

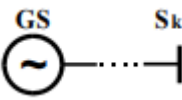
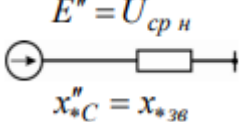
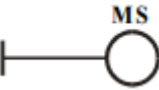
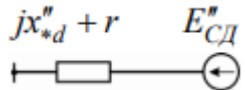
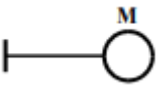
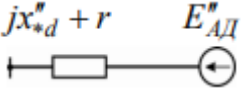
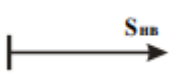


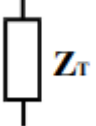
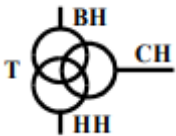
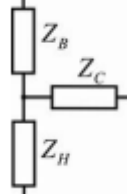
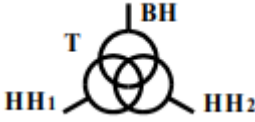
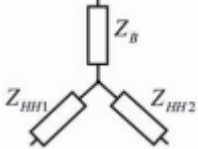
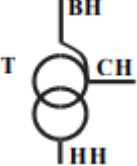
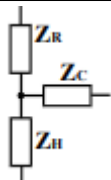
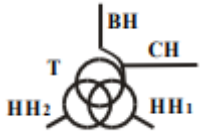
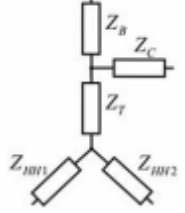


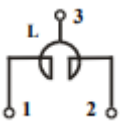
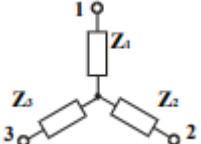




5. Схема заміщення та способи визначення показників її елементів

Розрахункову схему СЕП можна безпосередньо використовувати для обчислення струмів КЗ аналітичними методами. Вона містить реальні елементи (на різних ступенях напруги) з електромагнітними зв'язками, опорами втрат і розсіювання. З можливістю застосування методів теорії електричних кіл у розрахунках струмів КЗ схему СЕП слід подавати у вигляді електричного контуру. При цьому вважають, що КЗ – симетричне і перехідний процес аналізується в одній фазі. Для цього здійснюють перехід від розрахункової схеми до схеми заміщення, суть якого – в заміні окремих елементів електричними еквівалентами, з'єднаними у такій же послідовності (табл. 4).

Таблиця 4

Елементи СЕП у розрахункових схемах та їх електричні еквіваленти в схемах заміщення

Елемент	Позначення елемента в схемах	
	розрахунковій	заміщення
Генератор (синхронний компенсатор)	$G(GC)$ 	$E_{ГГ} \quad jx_{*d}'' + r$ 

Еквівалентне джерело системи		$E'' = U_{cpH}$ $x''_C = x_{*3B}$ 
Синхронний двигун		$jx''_d + r$ E''_{CD} 
Асинхронний двигун		$jx''_d + r$ E''_{AD} 
Узагальнене навантаження		Z_H E''_H 
Двообмотковий трансформатор		Z_T 
Триобмотковий трансформатор		Z_B Z_C Z_H 
Трифазний трансформатор з обмоткою НН, розщепленою на дві частини		Z_B Z_{H1} Z_{H2} 
Трифазний автотрансформатор		Z_R Z_C Z_H 
Група однофазних трансформаторів з обмоткою НН, розщепленою на дві частини		Z_B Z_C Z_T Z_{H1} Z_{H2} 
Одноланцюговий реактор		Z 
Подвоєний реактор		Z_1 Z_2 Z_3 
Повітряна лінія		X R 
Кабельна лінія		X R 

При обчисленні значень показників елементів схем заміщення потрібно врахувати:

- у спрощених методах розрахунку активні елементи (генеруючі джерела) розрахункової схеми заміщають еквівалентом у вигляді джерела е.р.с. та його опору, які визначаються для моменту часу $0 < t < \infty$ (табл. 1.4). Обчислюючи параметри режиму КЗ при $t = 0$, значення опорів елементів та струморозподіл у схемі передбачають незмінними для всіх моментів часу $0 < t < \infty$ перехідного процесу і рівними обчисленим;
- в уточнених методах розрахунку струмів КЗ у моменти часу перехідного процесу $0 < t < \infty$: обчислюють для генеруючих джерел ЕЕС показники E_t та X_t ; для пасивних же елементів ураховують зміну активної складової опору внаслідок нагрівання струмами КЗ.

Значення показників еквівалентів елементів у схемах заміщення визначають:

- 1) в іменованих одиницях виміру із зведенням (перерахунком) значень показників елементів до обраного основного ступеня напруги мережі з використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;
- 2) у відносних одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраних базисних умов з використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;
- 3) в іменованих одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраного основного ступеня напруги з використанням наближеного врахування коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;
- 4) у відносних одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраних базисних умов з використанням наближеного обліку коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;
- 5) в іменованих одиницях виміру із збереженням трансформаторних зв'язків (тобто без зведення значень показників елементів розрахункових схем до одного ступеня напруги) і використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів і автотрансформаторів.

Докладніше розглянемо зміст кожного із означених способів. Способи 1-й та 2-й називають точним зведенням в іменованих і відносних одиницях виміру, а 3-й і 4-й – наближеним відповідно.

1. Точне зведення в іменованих одиницях виміру полягає в перерахуванні значень показників елементів на ступінь напруги, який називають основним. Таким може бути будь-який ступінь напруги СЕП, в тому числі – й фіктивний.

Зведення значень параметрів режиму E_i, U_i, I_i та опору Z_i елемента в іменованих одиницях з i -го ступеня напруги, віддаленого від основного кількома послідовно ввімкненими трансформаторами з фактичними коефіцієнтами трансформації n_1, n_2, \dots, n_m , здійснюється за співвідношеннями:

$$\begin{aligned}\widehat{E} &= \dot{E}_i n_1 n_2 \dots n_m; \\ \widehat{U} &= \dot{U}_i n_1 n_2 \dots n_m; \\ \widehat{I} &= \dot{I}_i / (n_1 n_2 \dots n_m); \\ \widehat{Z} &= \dot{Z}_i (n_1 n_2 \dots n_m)^2.\end{aligned}\quad (1)$$

Тут $\underline{E}, \underline{U}, \underline{I}, \underline{Z}$ – зведені параметри, а коефіцієнт трансформації кожного трансформатора визначають як відношення напруги неробочого ходу обмотки, зверненої до основного ступеня напруги, до напруги неробочого ходу обмотки, зверненої до ступеня напруги, де міститься елемент, параметри якого зводяться.

Якщо первинні параметри режиму $E_{*н}, U_{*н}, I_{*н}$ та опір $Z_{*н}$ елемента задані у відносних одиницях виміру щодо номінальних умов (номінальні напруга U_n та потужність S_n на i -му ступені напруги), то їхні зведені до основного ступеня напруги значення в іменованих одиницях виміру встановлюють за виразами:

$$\begin{aligned}\widehat{E} &= \dot{E}_{*нi} U_n n_1 n_2 \dots n_m; \\ \widehat{U} &= \dot{U}_{*нi} U_n n_1 n_2 \dots n_m; \\ \widehat{I} &= \dot{I}_{*нi} S_n / (\sqrt{3} U_n n_1 n_2 \dots n_m); \\ \widehat{Z} &= \dot{Z}_{*нi} U_n^2 (n_1 n_2 \dots n_m)^2 / S_n.\end{aligned}\quad (2)$$

У схемі заміщення, де значення показників елементів зведені за співвідношеннями (1) і (2), обчислені значення параметрів режиму будуть натуральними тільки для основного ступеня напруги. Для іншого ж ступеня напруги СЕП натуральні значення струму та напруги визначають перерахуванням за відповідними коефіцієнтами трансформації трансформаторів між шуканим і основним ступенями.

2. Зміст точного зведення у відносних одиницях виміру – в перерахуванні значень показників елементів розрахункової схеми до базисних умов. Останні визначаються:

- довільно вибраним значенням базисної потужності S_ϕ (для спрощення розрахунку одного порядку з сумарною потужністю джерел живлення та кратної десяти, тобто 100, 1000);

- базисною напругою для ступеня напруги, що береться за основну, $U_{\text{б осн}}$;
- базисним струмом на основному ступені напруги

$$I_{\text{б осн}} = S_{\text{б}} / (\sqrt{3}U_{\text{б осн}}). \quad (3)$$

Для інших i -тих ступенів напруги СЕП базисну напругу обчислюють з урахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації, використовуючи формулу

$$U_{\text{б } i} = U_{\text{б осн}} / (n_1 n_2 \dots n_{i-1}), \quad (4)$$

а базисний струм – за виразом

$$I_{\text{б } i} = I_{\text{б осн}} (n_1 n_2 \dots n_{i-1}), \quad (5)$$

тобто для кожного ступеня напруги повинно зберігатися співвідношення

$$S_{\text{б}} = \sqrt{3}U_{\text{б } i}I_{\text{б } i}. \quad (6)$$

Якщо первинні показники елемента розрахункової схеми E_i , U_i , I_i та Z_i задані в іменованих одиницях виміру на i -му ступені напруги мережі СЕП, то для зведення їх до базисних умов застосовують вирази:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*\text{б}} &= \dot{E}_i / U_{\text{б } i}; \\ \dot{U}_{*\text{б}} &= \dot{U}_i / U_{\text{б } i}; \\ \dot{I}_{*\text{б}} &= \dot{I}_i / U_{\text{б } i}; \\ \underline{Z}_{*\text{б}} &= \underline{Z}_i S_{\text{б}} / U_{\text{б } i}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

де $U_{\text{б } i}$, $I_{\text{б } i}$ – відповідно базисна напруга та базисний струм того ступеня напруги мережі, на якому міститься даний елемент розрахункової схеми.

Якщо первинні показники E_{*ni} , U_{*ni} , I_{*ni} та Z_{*ni} елемента i -го ступеня напруги розрахункової схеми задані у відносних одиницях виміру щодо номінальних показників елемента (номінальні потужність S_n , напруга U_n , струм I_n), то їх зведення до базисних умов виконують за формулами:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*\text{б}} &= \dot{E}_{*ni} U_n / U_{\text{б } i}; \\ \dot{U}_{*\text{б}} &= \dot{U}_{*ni} U_n / U_{\text{б } i}; \\ \dot{I}_{*\text{б}} &= \dot{I}_{*ni} [S_n / (\sqrt{3}U_n)] (\sqrt{3}U_{\text{б } i} / S_{\text{б}}); \\ \underline{Z}_{*\text{б}} &= \underline{Z}_{*ni} (U_n^2 / S_n) (S_{\text{б}} / U_{\text{б } i}^2); \\ \underline{Z}_{*\text{б}} &= \underline{Z}_{*ni} (U_n / I_n) (I_{\text{б } i} / U_{\text{б } i}). \end{aligned} \quad (8)$$

У схемі заміщення зі значеннями показників елементів у відносних одиницях виміру, зведених до базисних умов, натуральні значення параметрів режиму (наприклад, струму КЗ) визначають:

- на основному ступені напруги

$$\dot{I}_{к осн} = \dot{I}_{*б к} I_{б осн}; \quad (9)$$

- на інших i -тих ступенях напруги

$$\dot{I}_{к i} = \dot{I}_{*б к} I_{б i}. \quad (10)$$

3. Наближене зведення в іменованих одиницях виміру має своєю суттю перерахування значень показників елементів розрахункової схеми до одного ступеня напруги, що береться за основний. При цьому зведення базується на використанні середніх значень коефіцієнтів трансформації трансформаторів чи автотрансформаторів. Для кожного ступеня напруги визначається середня номінальна напруга за шкалою, кВ: 1150; 750; 515; 400; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 1,21; 0,69; 0,4; 0,23; 0,133. Середні значення коефіцієнтів трансформації визначають рівними співвідношенням середніх номінальних напруг відповідних обмоток трансформатора або автотрансформатора. Враховуючи це, у формулах зведення (1) добуток коефіцієнтів трансформації для m послідовно ввімкнених між i -тим та основним ступенями трансформаторів:

$$n_{ср i} n_{ср i+1} \dots n_{ср m} = \frac{U_{ср i+1}}{U_{ср i}} \cdot \frac{U_{ср i+2}}{U_{ср i+1}} \dots \frac{U_{ср осн}}{U_{ср m}} = \frac{U_{ср осн}}{U_{ср i}}, \quad (11)$$

де $U_{ср i}$ – середня номінальна напруга i -го ступеня трансформації, з якого здійснюється перерахунок; $U_{ср осн}$ – те ж для основного ступеня напруги.

Зведення в іменованих одиницях виміру до основного ступеня напруги значень параметрів режиму та опорів з i -го ступеня напруги виконують за виразами:

$$\begin{aligned} \hat{E} &= \dot{E}_i (U_{ср осн} / U_{ср i}); \\ \hat{U} &= \dot{U}_i (U_{ср осн} / U_{ср i}); \\ \hat{I} &= \dot{I}_i / (U_{ср осн} / U_{ср i}); \\ \hat{Z} &= \underline{Z}_i (U_{ср осн} / U_{ср i})^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Параметри режиму КЗ, обчислені за виразами (12) і (13), будуть реальними для основного ступеня напруги, а для решти i -тих ступенів напруги дійсні значення визначають перерахуванням за середніми значеннями коефіцієнтів трансформації, наприклад струму КЗ:

$$\dot{I}_{к i} = \dot{I}_{к осн} / (U_{ср i} / U_{ср осн}). \quad (14)$$

4. Наближене зведення у відносних одиницях виміру – це перерахування до базисних умов значень показників елементів СЕП за середніми значеннями коефіцієнтів трансформації (11). Базисні умови задають: базисними

потужністю $S_{\bar{\sigma}}$ і напругою $U_{\bar{\sigma} \text{ осн}}$, що беруть останню рівною середній номінальній напрузі основного ступеня $U_{\bar{\sigma} \text{ осн}} = U_{\text{ср осн}}$; базисним струмом $I_{\bar{\sigma} \text{ осн}}$, що обчислюється за виразом (3).

На інших i -тих ступенях напруги базисні умови визначаються:

- значенням базисної напруги i -го ступеня, яке внаслідок обчислення відповідно до виразу (4) з урахуванням виразу (11) дорівнює її середній номінальній напрузі, тобто $U_{\bar{\sigma} i} = U_{\text{ср} i}$;
- значенням базисного струму i -го ступеня

$$I_{\bar{\sigma} i} = S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3} \bar{U}_{\text{ср} i}). \quad (15)$$

Якщо первинні значення показників елементів розрахункової схеми СЕП задані на i -му ступені напруги в іменованих одиницях виміру, то їх зведене значення визначають за виразами:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*\bar{\sigma}} &= \dot{E}_i (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i}) / U_{\text{ср осн}} = \dot{E}_i / U_{\text{ср} i}; \\ \dot{U}_{*\bar{\sigma}} &= \dot{U}_i (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i}) / U_{\text{ср осн}} = \dot{U}_i / U_{\text{ср} i}; \\ \dot{I}_{*\bar{\sigma}} &= [\dot{I}_i / (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i})] / [S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср осн}})] = \\ &= \dot{I}_i / [S_{\bar{\sigma}} / \sqrt{3} U_{\text{ср} i}] = \dot{I}_i / I_{\bar{\sigma} i}; \\ \underline{Z}_{*\bar{\sigma}} &= \underline{Z}_i (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i})^2 (S_{\bar{\sigma}} / U_{\text{ср осн}}^2) = \underline{Z}_i S_{\bar{\sigma}} / U_{\text{ср} i}^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Первинні показники елементів розрахункової схеми СЕП, задані у відносних одиницях виміру (щодо номінальних умов) на i -му ступені напруги, перераховують за виразами:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*\bar{\sigma}} &= \dot{E}_{*ni} U_{\text{ср} i} (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i}) / U_{\text{ср осн}} = \dot{E}_{*ni}; \\ \dot{U}_{*\bar{\sigma}} &= \dot{U}_{*ni} U_{\text{ср} i} (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i}) / U_{\text{ср осн}} = \dot{U}_{*ni}; \\ \dot{I}_{*\bar{\sigma}} &= \{ \dot{I}_{*ni} [S_n / (\sqrt{3} U_{\text{ср} i})] / (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i}) \} / \\ & / [S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3} U_{\text{ср осн}})] = \dot{I}_{*ni} S_n / S_{\bar{\sigma}}; \\ \underline{Z}_{*\bar{\sigma}} &= (\underline{Z}_{*ni} U_{\text{ср} i}^2 / S_n) (U_{\text{ср осн}} / U_{\text{ср} i})^2 / \\ & / (U_{\text{ср осн}}^2 / S_{\bar{\sigma}}) = \underline{Z}_{*ni} S_{\bar{\sigma}} / S_n. \end{aligned} \quad (17)$$

У кінцевому вигляді виразів (16) і (17) відсутня напруга основного ступеня, що спрощує розрахунки. Як бачимо з їх проміжних перетворень, вона враховується приховано.

5. У схемах заміщення із збереженням трансформаторних зв'язків показники елементів розраховують в іменованих одиницях виміру. Трансформаторні зв'язки зберігають, якщо:

- урахується перемикання розгалужень для регулювання напруги трансформаторів або автотрансформаторів;
- у розрахунковій схемі є паралельні до трансформаторних зв'язків контури з іншими значеннями коефіцієнтів трансформації;

- параметри режиму КЗ розраховують із застосуванням моделей змінного струму, де трансформаторні зв'язки вводять безпосередньо.
За цим способом розрахунку:
- показники елементів визначені для ступеня напруги, де вони розміщені; відповідно при зміні значення напруги внаслідок його регулювання необхідне переобчислення опорів елементів не лише для цього ступеня;
- обчислені параметри режиму КЗ мають натуральні значення на кожному ступені напруги.

Схема заміщення трансформатора із збереженням трансформаторного зв'язку складається без урахування гілки намагнічування з послідовно ввімкнених ідеального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $n_T = U_2/U_1$ і опору розсіювання трансформатора Z_T (рис. 1,а). Якщо паралельні кола мають трансформатори з різними значеннями коефіцієнтів трансформації (відповідно n_{T1} і n_{T2}), то схема заміщення таких паралельних кіл з трансформаторними зв'язками (рис. 1.1,б) містить в одному з кіл, наприклад у другому, додатковий ідеальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації n_{T2}/n_{T1} і в обох колах ідеальні трансформатори з коефіцієнтами трансформації n_{T1} та опори розсіювання Z_{T1} і Z_{T2} , з'єднані як і в розрахунковій схемі. Коли немає потреби враховувати індивідуальне регулювання напруги або паралельно ввімкнені трансформатори характеризуються маловідмінними коефіцієнтами трансформації, у наближених розрахунках можна використати середнє значення коефіцієнта трансформації $n_T \approx \sqrt{n_{T1} n_{T2}}$.

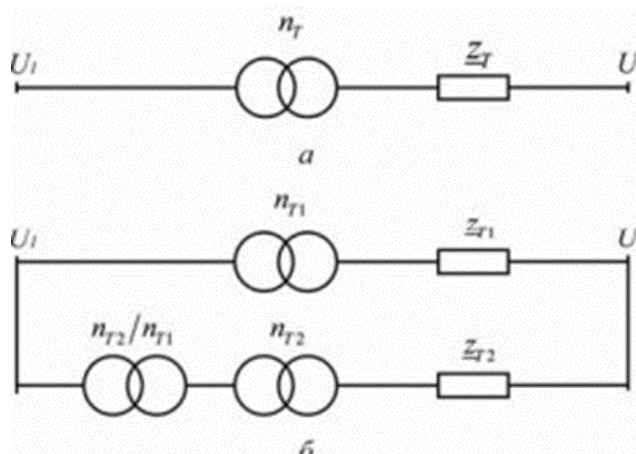


Рис. 1.1. Схеми заміщення із збереженням трансформаторних зв'язків: а – для одного трансформатора; б – для паралельно ввімкнених трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

6. Еквівалентні перетворення схем заміщення

Найчастіше основним завданням розрахунку режиму КЗ слугує визначення струму в аварійній вітці або точці КЗ. Тому схему заміщення СЕП

необхідно перетворити так, щоб аварійну вітку зберегти по можливості відокремленою до закінчення перетворення.

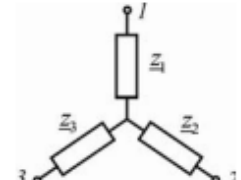
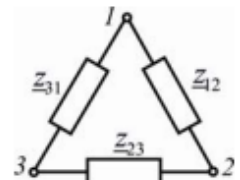
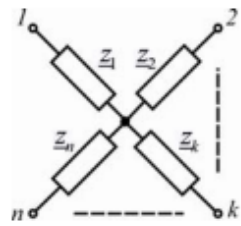
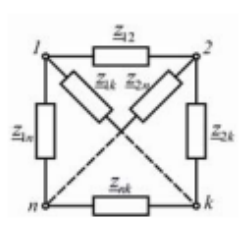
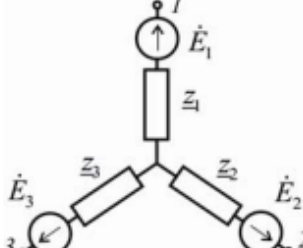
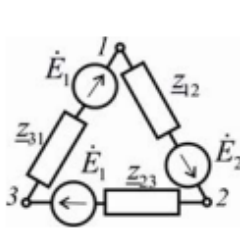
Шляхом еквівалентних перетворень схема заміщення СЕП зводиться до найпростішого вигляду для визначення результуючого опору короткозамкненого контуру. З цією метою використовують відомі методи перетворення лінійних електричних ланцюгів: послідовне і паралельне складання опорів; заміна кількох джерел з різними е.р.с. та опорами, приєднаних до загальної точки мережі, одним еквівалентним джерелом; перетворення трикутника на еквівалентну зірку, зірки – на еквівалентний трикутник і багатопроменевої зірки – на багатокутник з діагоналями (табл. 5).

Складну схему заміщення СЕП з кількома джерелами (рис. 2,а) можна перетворити з використанням коефіцієнтів струморозподілу на багатопроменеву схему заміщення з генеруючими променями до точки КЗ у вузлі променів (рис. 2,в). При перетворенні допускають рівність зведених е.р.с. джерел.

Таблиця 5

Еквівалентні перетворення схем

Вид перетворення	Схеми		Еквівалентні співвідношення
	первинна	еквівалентна	
Послідовне з'єднання			$z_{ек} = \sum_{k=1}^n z_k$
Паралельне з'єднання			$z_{ек} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/z_k)$
Заміна групи джерел еквівалентним			$\dot{E}_{ек} = z_{ек} \sum_{k=1}^n (\dot{E}_k / z_k);$ $z_{ек} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/z_k)$
Заміна трикутника зіркою			$z_{123} = z_{12} + z_{31} + z_{23};$ $z_1 = z_{12} z_{31} / z_{123};$ $z_2 = z_{12} z_{23} / z_{123};$ $z_3 = z_{23} z_{31} / z_{123}$

Заміна зірки трикутником			$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 / \underline{Z}_3$ $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 / \underline{Z}_1$ $\underline{Z}_{31} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1 / \underline{Z}_2$
Заміна багатопроменевої зірки багатокутником з діагоналями			$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 Y_{1-n};$ $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 Y_{1-n};$ <p>.....</p> $\underline{Z}_{k(k-1)} = \underline{Z}_k \underline{Z}_{k-1} Y_{1-n},$ <p>де $Y_{1-n} = \sum_{k=1}^n (1/\underline{Z}_k)$</p>
Заміна зірки з е.р.с. в променях трикутником з е.р.с.			$\begin{aligned} \dot{E}_{12} &= (\dot{E}_2 (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) - \\ &\quad - (\dot{E}_2 + \dot{E}_3) \underline{Z}_1) / \underline{Z}_{123}; \\ \dot{E}_{23} &= (\dot{E}_2 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) - \\ &\quad - (\dot{E}_1 + \dot{E}_3) \underline{Z}_2) / \underline{Z}_{123}; \\ \dot{E}_{31} &= (\dot{E}_3 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) - \\ &\quad - (\dot{E}_1 + \dot{E}_2) \underline{Z}_3) / \underline{Z}_{123}, \end{aligned}$ <p>де $\underline{Z}_{123} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$. Опори \underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{23}, \underline{Z}_{31} визначають як і при заміні зірки трикутником</p>

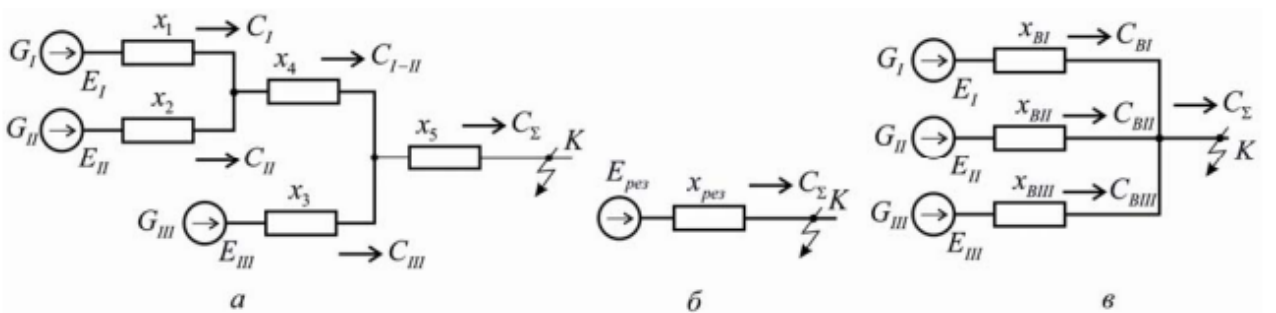


Рис. 2. Перетворення схеми заміщення з використанням коефіцієнтів струморозподілу: а – первинна складна; б – еквівалентна; в – багатопроменева

Коефіцієнти струморозподілу характеризують відносну частку кожного джерела в живленні місця КЗ.

Перетворення здійснюють послідовно за правилами:

- струм у місці КЗ умовно беруть рівним одиниці ($C_{\Sigma}=1$);
- коефіцієнти струморозподілу (свідчать про відносну частку струму КЗ, що перебігає вітками) порівнюють у генеруючих вітках первинної схеми заміщення (рис. 2,а) та відповідних променях нової схеми заміщення (рис. 2,в), тобто

$$C_I = C_{BI}; \quad C_{II} = C_{BII}; \quad C_{III} = C_{BIII}.$$

- При цьому для генеруючих віток обох схем заміщення виконують тотожності:

$$C_I + C_{II} + C_{III} = C_{\Sigma}; \quad C_{BI} + C_{BII} + C_{BIII} = 1;$$

- результуючий опір первинної схеми заміщення (рис.1.2,б) визначають об'єднанням нульових точок джерел живлення G_I, G_{II}, G_{III} , тобто

$$x_{рез} = x_5 + x_3 [x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

- коефіцієнти струморозподілу в паралельних вітках первинної схеми заміщення обернено пропорційні їх опорам:

$$C_{III} / C_{\Sigma} = [x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_{I-II} / C_{\Sigma} = x_3 / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_I / C_{I-II} = [x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / x_1;$$

$$C_{II} / C_{I-II} = [x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / x_2;$$

- значення коефіцієнтів, розпочинаючи від місця КЗ і закінчуючи вітками джерел живлення, знаходять за первинною схемою заміщення:

$$C_{III} / C_{\Sigma} = [x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_{I-II} / C_{\Sigma} = x_3 / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_I = C_{I-II} x_2 / (x_1 + x_2);$$

$$C_{II} = C_{I-II} - C_I;$$

- значення коефіцієнтів, розпочинаючи від місця КЗ і закінчуючи вітками джерел живлення, знаходять за первинною схемою заміщення:

$$C_{III} / C_{\Sigma} = [x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)] / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_{I-II} / C_{\Sigma} = x_3 / [x_3 + x_4 + x_1 x_2 / (x_1 + x_2)];$$

$$C_I = C_{I-II} x_2 / (x_1 + x_2);$$

$$C_{II} = C_{I-II} - C_I;$$

- за $x_{рез}$ і $C_{BI}, C_{BII}, C_{BIII}$ визначають опори променів нової схеми заміщення:

$$x_{BI} = C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BI};$$

$$x_{BII} = C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BII};$$

$$x_{BIII} = C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BIII}.$$

Якщо трифазне КЗ у вузлі з кількома вітками, то цей вузол можна розрізати, зберігши КЗ на кінці кожної окремої вітки. Отриману схему заміщення легко перетворити далі відносно будь-якої вітки з точкою КЗ, враховуючи інші вітки з КЗ як навантажувальні з е.р.с., рівними нулю. Такий

прийом ефективний, коли необхідно знайти струм в одній з віток, приєднаних до вузла з КЗ.

При симетрії схеми заміщення СЕП стосовно точки КЗ або симетрії ділянки схеми щодо будь-якої проміжної точки в ході перетворення можна з'єднати точки з однаковими потенціалами і вилучити із схеми опори, якими струми КЗ не перебігають.

Перетворення схем заміщення СЕП спрощується, якщо трипроменеву зірку замінити еквівалентним трикутником, а потім розрізати по вершині, де прикладена е. р. с.

Заміна двох або більше джерел живлення одним еквівалентним можлива, якщо джерела живлення перебувають практично в однакових умовах відносно точки КЗ, що перевіряється за виразом

$$S_{I_n} x_{I_{рез}} / (S_{II_n} x_{II_{рез}}) = 0,4...2,5.$$

Тут S_{I_n} , S_{II_n} – номінальні потужності джерел; $x_{I_{рез}}$, $x_{II_{рез}}$ – результуючі опори між відповідним джерелом живлення і точкою КЗ.

При перетворенні схеми заміщення СЕП джерело меншої потужності можна не враховувати, якщо

$$x_{I_{рез}} / x_{II_{рез}} \geq 20 \text{ і } S_{I_n} / S_{II_n} \leq 0,05.$$

Складні схеми заміщення СЕП не обов'язково перетворювати аналітичним шляхом, а еквівалентувати за допомогою розрахункових моделей постійного або змінного струму. Для зведення схеми заміщення до простішого вигляду результуючий опір між кожним джерелом і точкою КЗ визначається безпосереднім вимірюванням.

Отримані в умовах розглянутих перетворень еквівалентні е.р.с. джерел живлення та результуючі опори короткозамкненого кола – первинні для визначення струмів і напруг при КЗ.

7. Застосування наближеного зведення для розрахунку опорів схем заміщення

Показники елементів короткозамкненого кола розрахункової схеми зводять до базисних умов за загальними виразами (16) і (17). У практичних розрахунках опори (відн. од. виміру) для конкретних елементів короткозамкненого кола визначають за нижченаведеними формулами (розрахункові схеми та схеми заміщення окремих елементів – у табл. 5).

При ввімкненні синхронних генераторів, компенсаторів та синхронних двигунів на i -му ступені напруги з $U_{\delta i} = U_{cpi}$

$$x_{*\delta} = x_{*d} S_{\delta} / S_n; \quad (18)$$

на ступені напруги з $U_{cp} \neq 1,05U_n$

$$x_{*\delta} = (x_{*d} U_n^2 / S_n) / (U_{\delta i}^2 / S_{\delta}); \quad (19)$$

$$r_{*\delta} = x_{*\delta} / (\omega T_a).$$

Для синхронних двигунів $x_{*H} = x_d'' \approx 1 / I_{*пуск}$, де $I_{*пуск} = I_{пуск} / I_H$ – кратність пускового струму при пуску від повної напруги. Для асинхронних двигунів $x_{*H} = x_*'' = 1 / I_{*пуск}$ (у формули (18), (19) замість x''_{*d} необхідно підставити x''_*).

Зведений опір джерел ЕЕС

$$x_{*\delta} = x_{*GS}'' S_{\delta} / S_H \quad (20)$$

або

$$x_{*\delta} = S_{\delta} / S_{кл0} \approx I_{\delta i} / I_{внмн} \quad (21)$$

При ввімкненні трифазних двообмоткових трансформаторів на i -му ступені напруги з $U_{\delta i} = U_{сп i}$

$$Z_{*\delta} = (u_k / 100) S_{\delta} / S_H; \quad (22)$$

$$r_{*\delta} = \Delta P_k S_{\delta} / S_H^2; \quad (23)$$

$$x_{*\delta} = \sqrt{Z_{*\delta}^2 - r_{*\delta}^2}. \quad (24)$$

Для трифазних трансформаторів (автотрансформаторів):

$$\left. \begin{aligned} Z_{*\delta B} &= 0,5(u_{kB-H} + u_{kB-C} - u_{kC-H}) S_{\delta} / (100S_H) \\ Z_{*\delta C} &= 0,5(u_{kB-C} + u_{kC-H} - u_{kB-H}) S_{\delta} / (100S_H) \\ Z_{*\delta H} &= 0,5(u_{kB-H} + u_{kC-H} - u_{kB-C}) S_{\delta} / (100S_H) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$r_{*\delta B} = r_{*\delta C} = r_{*\delta H} = 0,5 \Delta P_k S_{\delta} / S_H^2. \quad (26)$$

Для трифазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН та окремою роботою частин обмотки НН1 і НН2

$$\left. \begin{aligned} Z_{*\delta B} &= u_{kB-НН} (1 - \kappa_{розц} / 4) S_{\delta} / (100S_H) \\ Z_{*\delta НН1} &= Z_{*\delta НН2} = u_{kB-C} \kappa_{розц} S_{\delta} / (200S_H) \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{*\delta B} &= \Delta P_{kB-НН} S_{\delta} / S_H^2 \\ r_{*\delta НН1} &= r_{*\delta НН2} = 2r_{*\delta B} \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

де $\kappa_{розц}$ – коефіцієнт розщеплення ($\kappa_{розц} = Z_{розц} / Z_{kB-НН}$); $Z_{НН1} = Z_{НН2} = Z_{розц} / 2$. За даними випробувань $\kappa_{розц} = 3,5$. При цьому

$$\left. \begin{aligned} Z_{*\delta B} &= 0,125 u_{kB-НН} S_{\delta} / (100S_H) \\ Z_{*\delta НН1} &= Z_{*\delta НН2} = 1,75 u_{kB-НН} S_{\delta} / (100S_H) \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

У разі паралельної роботи частин обмотки НН1 та НН2 трансформатор має наскрізний індуктивний опір

$$Z_{*\delta СК} = (u_{kB-НН} / 100) S_{\delta} / S_H. \quad (30)$$

Опір трансформаторів з РПН обчислюють залежно від регульованої напруги U_{Bn} на даному розгалуженні n та напруги КЗ u_{kn} за формулою

$$Z_{*\delta n} = (u_{kn} / 100) (U_{Bn}^2 / S_H) / (U_{\delta i}^2 / S_{\delta}). \quad (31)$$

Напряга короткого замикання та відповідна йому напруга розгалуження, що входять до (31), визначаються для трьох положень регулятора РПН: середнього і двох крайніх. Установлюють розрахункові значення цих напруг, віднесених до номінальної потужності трансформатора та напруг відповідних розгалужень. Для трансформатора з розщепленою обмоткою НН значення $u_{кВ-Н}$ віднесене для значення потужності $S_{НН(НН2)} = 0,5S_n$. Для триобмоткового трансформатора опори трипроменевої схеми заміщення розраховують за (31) після визначення за даними значеннями напруг КЗ обмоток

$$u_{кВ-Сн}, u_{кВ-Нн}, u_{кС-Нн}, u_{кВн}, u_{кСн}, u_{кНн}$$

у середньому та крайніх положеннях регулятора РПН.

При ввімкненні однофазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН

$$\left. \begin{aligned} Z_{*бВ} &= 0 \\ Z_{*бНН1} &= Z_{*бНН2} = 2(u_{кВ-НН} / 100)S_{б} / S_n \end{aligned} \right\}, \quad (32)$$

а для однофазних трансформаторів з такою ж обмоткою

$$\left. \begin{aligned} Z_{*бВ} &= 0,5(u_{кВ-Н} + u_{кВ-С} - u_{кС-Н})S_{б} / (100S_n) \\ Z_{*бС} &= 0,5(u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н})S_{б} / (100S_n) \\ Z_{*бНН1} &= Z_{*бНН2} = 2Z_{*ск}S_{б} / S_n \\ Z_{*бНН} &= (Z_{*НН} - Z_{*ск})S_{б} / S_n \end{aligned} \right\}, \quad (33)$$

де

$$Z_{*ск} = (u_{кВ-Н} / 100) \parallel (u_{кС-Н} / 100);$$

$$Z_{*НН} = 0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С}) / 100.$$

Зведений опір одноланцюгового реактора

$$x_{*б} = x_n I_{б} U_{рн} / (100 I_{рн} U_{бi}); \quad (34)$$

$$r_{*б} = \Delta P_n S_{б} / (I_{рн}^2 U_{бi}^2), \quad (35)$$

а для подвоєного

$$\left. \begin{aligned} x_{*б1} &= x_{*б2} = (1 + \kappa_{зв}) x_n I_{б} U_{рн} / (100 I_{рн} U_{бi}) \\ x_{*б3} &= -\kappa_{зв} x_n I_{б} U_{рн} / (100 I_{рн} U_{бi}) \end{aligned} \right\}; \quad (36)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{*б1} &= r_{*б2} = \Delta P_n S_{б} / (I_{рн}^2 U_{бi}^2) \\ r_{*б3} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (37)$$

Зведені опори лінії електропередачі

$$\left. \begin{aligned} r_{*б} &= r_0 l S_{б} / U_{срi}^2 \\ x_{*б} &= x_0 l S_{б} / U_{срi}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$