МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Спеціальні розділи електроенергетики»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою № 4 – Короткі замикання у системах електропостачання

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО
Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО
Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 22.09.2021 № 2

ПОГОДЖЕНО
Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 30.08.2021 № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Ушкодження електричних мереж і установок.
2. Призначення розрахунків аварійних струмів.
3. Допущення при розрахунках струмів короткого замикання.
4. Процес протікання короткого замикання.
5. Розрахункові схеми.
6. Схеми заміщення і їх перетворення.
7. Опори елементів кола короткого замикання.
8. Розрахунок струмів короткого замикання.
9. Розрахунок струмів КЗ від двигунів. (сам. роб.)
10. Розрахунок струмів КЗ для вибору вимикачів. (сам. роб.)
11. Несиметричні коротки замикання. (сам. роб.)
12. Розрахунок струмів КЗ у мережах напругою до 1000 В. (сам. роб.)
13. Особливості розрахунку струмів КЗ для релейного захисту й автоматики. (сам. роб.)
14. Нагрівання струмоведучих частин струмами КЗ.
15. Електродинамічна дія струмів КЗ. (сам.роб.)
16. Обмеження струмів короткого замикання.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.

2. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.

3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.

4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.И. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.

5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. –Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

Допоміжна література:

1. Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О., Ялова О.М. Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювана енергетика. Навчальний посібник – Кривий Ріг –Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В. 2017, – 218 с.

2. Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О, Мельник О.Є. Нормативно-правова база енергетики Навчальний посібник – Кривий Ріг – Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О.В. 2017, – 150 с.

3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : www.rada.gov.ua.

2. Нормативні акти України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.nau.kiev.ua.

3. Закон України "Про ринок електричної енергії" – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : – https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19.

4. Закон України "Про електроенергетику" – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: - https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80.

Текст лекції

1. Ушкодження електричних мереж і установок

Порушення нормальної роботи електричних установок і системи електропостачання обумовлені переважно короткими замиканнями й замиканнями на землю. Коротким замиканням (КЗ) називається всяке непередбачене нормальним режимом замикання між струмоведучими частинами, що належать до різних фаз. Замиканням на землю називається всяке непередбачене нормальним режимом замикання на землю струмоведучих частин.

Основними причинами виникнення КЗ і замикань на землю є:

природне зношування або механічне ушкодження ізоляції, перекриття голих струмоведучих частин, комутаційні й атмосферні перенапруги. При КЗ зменшується загальний опір проводів і струмоведучих частин системи електропостачання, що призводе до збільшення струмів і зниженню напруги, особливо в точці КЗ. Як правило, у точці КЗ виникає електрична дуга, що утворює перехідний опір. Безпосереднє КЗ без перехідного опору називається металевим КЗ. Зневага перехідним опором спрощує розрахунки й забезпечує максимальне значення струму КЗ при тих самих вихідних умовах, що вкрай важливо для вибору апаратури.

Струми КЗ в електричних установках можуть досягати значних величин. Ці аварійні струми становлять небезпеку для апаратури й струмоведучих частин електричних установок, тому що останні можуть перегріватися понад припустиму температуру й піддаватися великим механічним діям.

При трифазній системі електропостачання можливі три основних види КЗ: трифазне, двофазне й однофазне (рис. 1). При трифазному КЗ три фази з'єднуються між собою (рис. 1, а). Струм, напруга, потужність і точка трифазного КЗ позначаються: $I^{(3)}$, $U^{(3)}$, $S^{(3)}$, $K^{(3)}$.

Двофазне КЗ характеризується замиканням двох фаз між собою (рис. 1, б), умовні позначки: $I^{(2)}$, $U^{(2)}$, $S^{(2)}$, $K^{(2)}$. При однофазному замиканні спостерігається замикання однієї з фаз на землю (рис. 1,б) або на нульовий провід (рис. 1, г). Умовні позначки наступні: $I^{(1)}$, $U^{(1)}$, $S^{(1)}$, $K^{(1)}$. Трифазні КЗ є симетричними, тому що при цьому всі фази виявляються в однакових умовах, і симетрія струмів і напруг не порушується. Всі інші види КЗ несиметричні. Найчастіше виникають однофазні (до 65% загального числа замикань) і значно рідше – трифазні

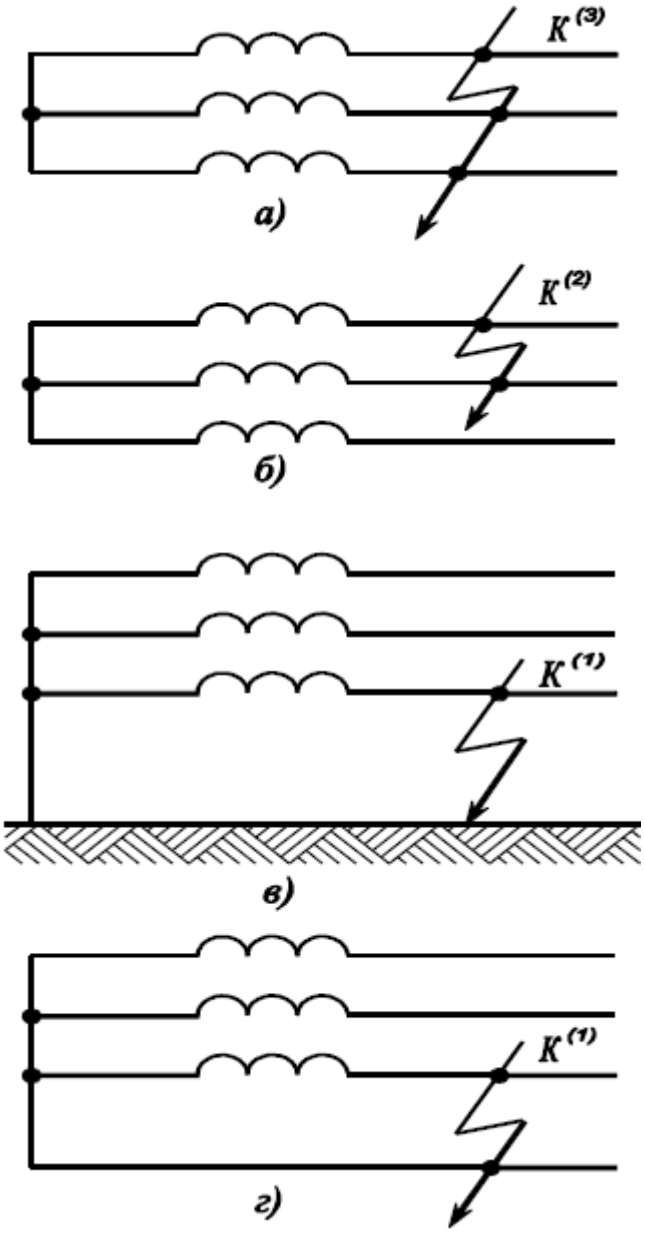


Рисунок 1. - Види коротких замикань:
а – трифазне; б – двофазне; в – однофазне на землю;
г - однофазне на нульовий провід

Який вид КЗ є найбільш важким для системи електропостачання - передбачити важко. Тому залежно від призначення розрахунку звичайно визначають значення струмів КЗ як для симетричних, так і несиметричних КЗ. Практика розрахунків показує, що найбільш важким режимом для системи електропостачання є трифазні й двофазні КЗ.

Зазначені ушкодження характеризуються появою аварійних струмів, які значно перевищують струми нормального режиму. Однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою або заземленою через дугогасний реактор (котушку) нейтралью не є короткими, не супроводжуються істотною зміною струмів у струмоведучих частинах системи електропостачання. Такі

ушкодження, як правило, не представляють небезпеки для елементів розподільної мережі.

На шинах електроустановок КЗ виникають: через забруднення або ушкодження шинних ізоляторів, втулок вимикачів і вимірювальних трансформаторів; при помилкових діях персоналу із шинними роз'єднувачами; від поломок ізоляторів роз'єднувачів і вимикачів під час операцій з ними. Імовірність ушкодження на шинах відносно невелика, але може привести до досить важких наслідків для системи електропостачання в цілому.

Більшість ушкоджень в електричних мережах, і особливо на лініях, супроводжується появою електричної дуги. Протягом кожного півперіоду опір дуги значно змінюється і впливає на значення струму та форму напруги, особливо при міжфазових замиканнях. Для оцінки роботи деяких захистів варто враховувати опір дуги, особливо для захистів, що працюють із витримкою часу, тому що в цьому випадку можлива зміна опору дуги за рахунок подовження дуги під впливом вітру, конвекції повітря і електродинамічних зусиль.

Міжфазові КЗ, з огляду на значення їхніх струмів, при таких ушкодженнях повинні існувати мінімально можливий час. Варто мати на увазі, що збільшення існування міжфазових КЗ (наприклад, за рахунок збільшення витримок часу у пристроїв захисту) приводить не тільки до порушення роботи споживачів, але й викликає перегоряння провідників у точці КЗ, руйнування апаратури, неприпустимі перегріви ізоляції й т.д.

Для оцінки роботи релейного захисту варто враховувати різний вплив трифазних і двофазних КЗ на значення і фазу залишкових напруг по довжині лінії. На рис. 2 наведені спрощені векторні діаграми для залишкових фазних і міжфазових напруг у лінії при металевих замиканнях наприкінці лінії (джерело нескінченної потужності). З рис. 2 видно, що в міру видалення від точки КЗ $К^{(3)}$ і $К^{(2)}$ міжфазові напруги зростають і змінюються їхні фазові співвідношення (при двофазних КЗ (точка $К^{(2)}$). При міжфазових КЗ через перехідні опори, неоднакові для різних фаз, відбувається перекручування залишкових напруг (а також і струму КЗ) по величині й по фазі, і з'являються складові зворотної послідовності, що може бути використано релейним захистом для розпізнавання ушкодження.

До основних видів ушкоджень у силових трансформаторах і автотрансформаторах варто віднести: замикання між фазами усередині кожуха трансформатора і на зовнішніх виводах обмоток, в обмотках між витками однієї фази, на корпус обмоток або їхніх зовнішніх виводів; ушкодження магнітопроводу, що приводять до локального нагрівання й "пожежі сталі", бака маслонаповнених трансформаторів.

Міжфазові КЗ усередині трансформаторів малоймовірні внаслідок великої електричної міцності міжфазової ізоляції. У трансформаторних групах, складених із трьох однофазних трансформаторів, замикання між обмотками фаз практично виключені.

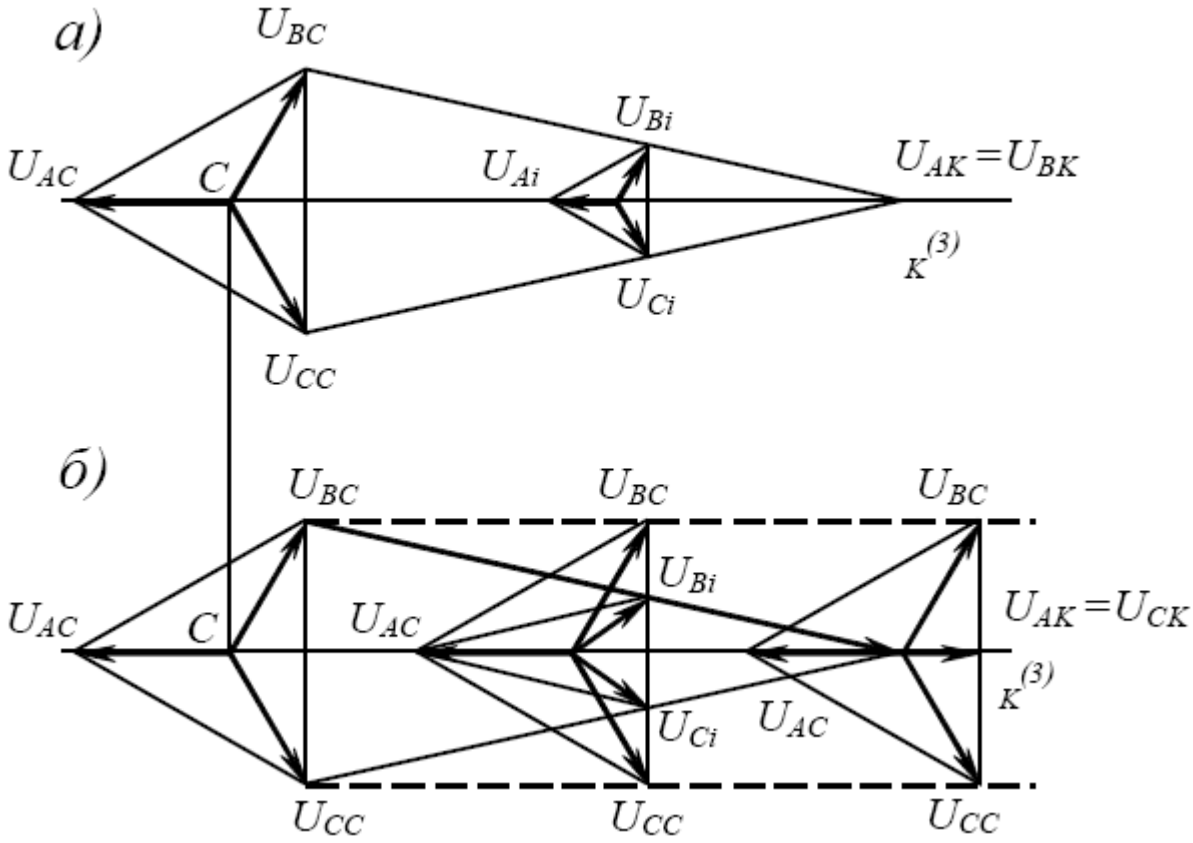


Рисунок 2. - Спрощена векторна діаграма залишкових напруг на затискачах джерела (системи), у точці КЗ і в проміжних точках при металевих КЗ:
а - трифазні КЗ; б - двофазні КЗ між фазами В и С

При виткових замиканнях в обмотках електричних машин значення аварійного струму від джерела живлення та місця ушкодження

теоретично може бути визначено вираженням

$$I_к = W_к I_{к.в} / W ,$$

де Wк і W — число витків відповідно закорочених і всього в даній фазі трансформатора; Ік.в — струм у закорочених витках.

З формули видно, чим менше число закорочених витків, тим менше струм Ік, що приходить із мережі, у той час, як значення струму Ік.в порівняно зі струмами міжфазових КЗ. При малому числі закорочених витків аварійний струм незначно відрізняється від струмів нормального режиму й практично не сприймається пристроями захисту.

Ушкодження магнітопроводу й ушкодження бака маслонаповнених трансформаторів не супроводжуються змінами струмів в обмотках і від джерела, однак експлуатація трансформаторів із зазначеними ушкодженнями неодмінно приводить до більш важких електричних ушкоджень і виходу з ладу силових трансформаторів.

Для трифазних електродвигунів характерні такі ушкодження, як багатофазні КЗ в обмотці статора й на її затискачах. Замикання на корпус (на землю), виткові замикання в обмотці однієї фази. Міжфазові КЗ можуть не

тільки викликати значні руйнування в самому двигуні, але й супроводжуються зниженням напруги в живильній мережі та можуть привести до порушення роботи інших електроприймачів. Однофазні замикання в обмотках статора на корпус, з огляду на те, що розподільчи мережі працюють із ізольованою нейтралью, супроводжуються невеликими струмами замикання (до 30 А) і безпосередньої небезпеки для двигунів не представляють. Спеціальні захисти від виткових КЗ в обмотках статора для електродвигунів, з огляду на складність їхнього виконання, а також захист синхронних двигунів від ушкоджень в обмотці ротора, як правило, не передбачають. У деяких окремих випадках для потужних синхронних двигунів передбачають окремий захист від обриву кола збудження.

З огляду на конструктивне виконання конденсаторних установок, основними видами їхнього ушкодження варто вважати електричний пробій ізоляції між обкладками або на корпус, тобто двофазні короткі й однофазні замикання на землю. При живленні конденсаторних установок кабельними лініями, в останніх можливі всі види ушкоджень, включаючи й двофазні КЗ.

Короткі замикання виникають у результаті порушень ізоляції електроустановок, що є наслідком різних причин:

- старіння ізоляції в процесі експлуатації електроустаткування;

- перенапруг; прямих ударів блискавки; механічних ушкоджень;

накидів сторонніх предметів на струмоведучі частини; незадовільного догляду за електроустаткуванням; помилкової дії обслуговуючого персоналу.

Наслідками КЗ є:

- неприпустиме нагрівання електроустаткування і його термічне ушкодження через значне збільшення струмів (у 10-15 разів і більше);

- поява значних зусиль між струмоведучими частинами, які можуть привести до їхнього механічного ушкодження й руйнування;

- зниження напруги і спотворення її симетрії, що негативно позначається на роботі споживачів. Так, при зниженні напруги на 30-40% протягом часу не менш 1с зупиняються електродвигуни, у результаті чого можливі порушення технологічного циклу на підприємствах, поява браку продукції та інших наслідків, пов'язані з народногосподарським збитком;

- наведення при несиметричних КЗ ЕРС у сусідніх лініях зв'язку та сигналізації, небезпечних для обслуговуючого персоналу і використовуваної апаратури;

- порушення стійкості окремих елементів і режиму СЕП у цілому, що приводить до виникнення аварійних ситуацій з відключенням великої кількості споживачів електричної енергії;

- загоряння електроустановок.

Найнебезпечніші наслідки проявляються звичайно в елементах системи, що прилягають до місця виникнення КЗ. Якщо КЗ з'явилося на великій електричній віддаленості від джерела живлення, то збільшення струму сприймається генераторами як деяке підвищення навантаження, а сильне зниження напруги відбувається тільки поблизу місця трифазного КЗ.

Щоб забезпечити безаварійне електропостачання всіх споживачів, необхідно проектувати й споруджувати СЕП з обліком можливих КЗ, строго дотримувати правил технічної експлуатації електроустановок, безупинно підвищувати технічний рівень і якість виготовлення застосовуваного електроустаткування. Для виключення небезпечних наслідків від КЗ у СЕП і забезпечення стійкості навантаження вводять швидкодіючі релейні захисти окремих елементів, застосовують спеціальні схеми системної автоматики, передбачають поділ у часі процесів самозапуску різних груп двигунів, установлюють регулюючі пристрої і ін.

2. Призначення розрахунків аварійних струмів

Розрахунок електромагнітних перехідних процесів у СЕП при КЗ передбачає визначення струмів і напруг у тому або іншому короткозамкненому колі при заданих (розрахункових) умовах. Він має важливе значення для проектування й експлуатації СЕП. Відповідно до цільового призначення розрахунку знаходять зазначені параметри для моменту часу, що цікавить, або обчислюють їхні зміни протягом перехідного процесу залежно від поставленого завдання. При цьому розраховують струми КЗ в окремих гілках або точках кола з метою визначення найбільш характерного для того або іншого електроустаткування розрахункового аварійного режиму.

Розрахунки струмів КЗ необхідні для наступних кінцевих цілей:

- виявлення умов роботи споживачів при можливих КЗ і визначення допустимості того або іншого режиму;
- вибору електричних апаратів електроустановок за умовами термічної та електродинамічної стійкості;
- проектування та настроювання засобів релейного захисту і автоматики СЕП;
- зіставлення, оцінки і вибору схем електричних з'єднань СЕП;
- координації й оптимізації значень струмів КЗ;
- оцінки стійкості роботи СЕП і її вузлів навантаження;
- проектування заземлюючих пристроїв;
- визначення впливу струмів КЗ на лінії зв'язку;
- аналізу аварій в електроустановках.

Точність розрахунку КЗ залежить від його цільового призначення. Для вибору й перевірки електричних апаратів точність розрахунку може бути нижче, ніж для рішення інших завдань. Так, при виборі засобів релейного захисту і автоматики точність розрахунку аварійних режимів повинна бути значно вище. У цьому випадку необхідно визначити найбільші й найменші значення струмів і напруг, можливий зсув між ними в окремих фазах або між їх симетричними складовими й т.п.

3. Допущення при розрахунках струмів короткого замикання

Розрахунок струмів КЗ у сучасних великих СЕП являє собою складне й трудомістке завдання навіть із застосуванням засобів обчислювальної техніки. При рішенні більшості практичних завдань, пов'язаних з розрахунками струмів КЗ, приймають ряд допущень, що не вносять істотних погрішностей у точність розрахунків. Стосовно до мереж напругою вище 1 кВ основні допущення наступні:

- зневажають насиченням магнітних систем всіх елементів кола КЗ (генераторів, трансформаторів і електродвигунів);
- всі навантаження представляють постійними індуктивними опорами;
- зневажають активними опорами елементів схеми, якщо відношення результуючих опорів від джерела до точки КЗ $r_{рез}/x_{рез} \le 1/3$ (активні опори враховують тільки при визначенні ступеня загасання аперіодичних складових струмів КЗ);
- зневажають ємнісними провідностями на землю ПЛ напругою до 220кВ (для КЛ напругою 110 кВ і вище ємнісні провідності необхідно враховувати);
- не враховують зсув по фазі ЕРС джерел енергії, що входять у розрахункову схему;
- вважають, що всі елементи СЕП симетричні, а порушення симетрії відбувається тільки в місці КЗ;
- враховують у вигляді узагальнених навантажень центрів живлення всі електроприймачі, за винятком потужних електродвигунів, підключених безпосередньо в місці КЗ або на невеликому електричному видаленні від нього;
- зневажають розходженням значень зверхперехідних індуктивних опорів по поздовжній і поперечній осях синхронних машин;
- зневажають струмами намагнічування трансформаторів і автотрансформаторів.

Електричні мережі напругою до 1 кВ є в основному розподільними, розгалуженими, містять значну кількість силових елементів, пристроїв, апаратів контролю й керування. Як правило, вони живляться від одного потужного джерела, для якого в аварійних режимах (КЗ) можна припустити $U_c = const$.

4. Процес протікання короткого замикання

Джерелами живлення місця КЗ є: турбо- і гідрогенератори електростанцій; високовольтні синхронні двигуни й компенсатори, які при визначенні струмів КЗ розглядаються як синхронні генератори для часу t = 0. Вплив асинхронних двигунів ураховується в тих випадках, коли вони підключені безпосередньо до місця КЗ. Всі джерела електричної енергії умовно розділяють на джерела необмеженої потужності й джерела обмеженої

потужності. В електричній системі необмеженої потужності ($S_c = \infty$) напруга на шинах практично незмінна при КЗ у будь-якій точці системи. Індуктивний опір такої системи прийнято вважати рівним нулю. У системі обмеженої потужності ($S_c \neq \infty$) при КЗ напруга на шинах зменшується. Опір такої системи відрізняється від нуля. Віддаленість точок КЗ характеризується сумарним опором у колі від джерела енергії до розглянутої точки.

При виникненні КЗ починається перехідний процес. Цей процес протікає при наявності двох складових струмів КЗ: аперіодичної та періодичної (коливальної). Частина процесу КЗ, що характеризується зміною амплітудних значень струму КЗ, прийнято називати несталим.

У сталому режимі амплітуди струмів КЗ постійні.

При КЗ струм у колі зростає (рис. 5.3,а). Однак миттєвого збільшення струму (крива ік) відбутися не може через те, що коло має індуктивний опір. У початковий момент КЗ в обмотці статора генератора електростанції і в індуктивних опорах кола наводиться ЕДС самоіндукції, що перешкоджає зміні струму. У той же час індукується струм самоіндукції зустрічного напрямку. Цей струм носить назву аперіодичного (крива іа, рис. 3). Тому з моменту виникнення КЗ струм можна представити складеним з двох складових: вільного аперіодичного струму, тобто аперіодичної складової струму, і періодичного струму, тобто вимушеного періодичного струму, створюваного ЕДС генераторів. У результаті взаємної дії цих складових струмів у колі, для початкового моменту КЗ дорівнює миттєвому значенню

струму нормального режиму:

$$i_{н0} = i_{п0} + i_{а0},$$

де іа0 — початкове значення аперіодичної складової струму КЗ; іп0— початкове значення періодичної складової струму КЗ; ін0— миттєве значення струму навантаження.

Початкове значення аперіодичної складової струму КЗ

$$i_{а0} = i_{н0} - i_{п0}.$$

З формули випливає, що початкове значення аперіодичного струму буде максимальним при значенні струму навантаження рівному нулю (ін0=0) і виникненні КЗ у той момент, коли періодична складота повинна мати найбільше (амплітудне) значення:

$$i_{а\,макс} = -I_{п\,макс}.$$

На рис. 3,а наведені криві зміни струму КЗ у системі необмеженої потужності. Періодичний струм іп протікає під дією напруги джерела та змінюється за гармонійною кривою синхронної частоти.

Тому що напруга джерела незмінна, значення періодичного струму протягом усього процесу постійні й рівні $I'' = I_{nt} = I_{\infty}$.

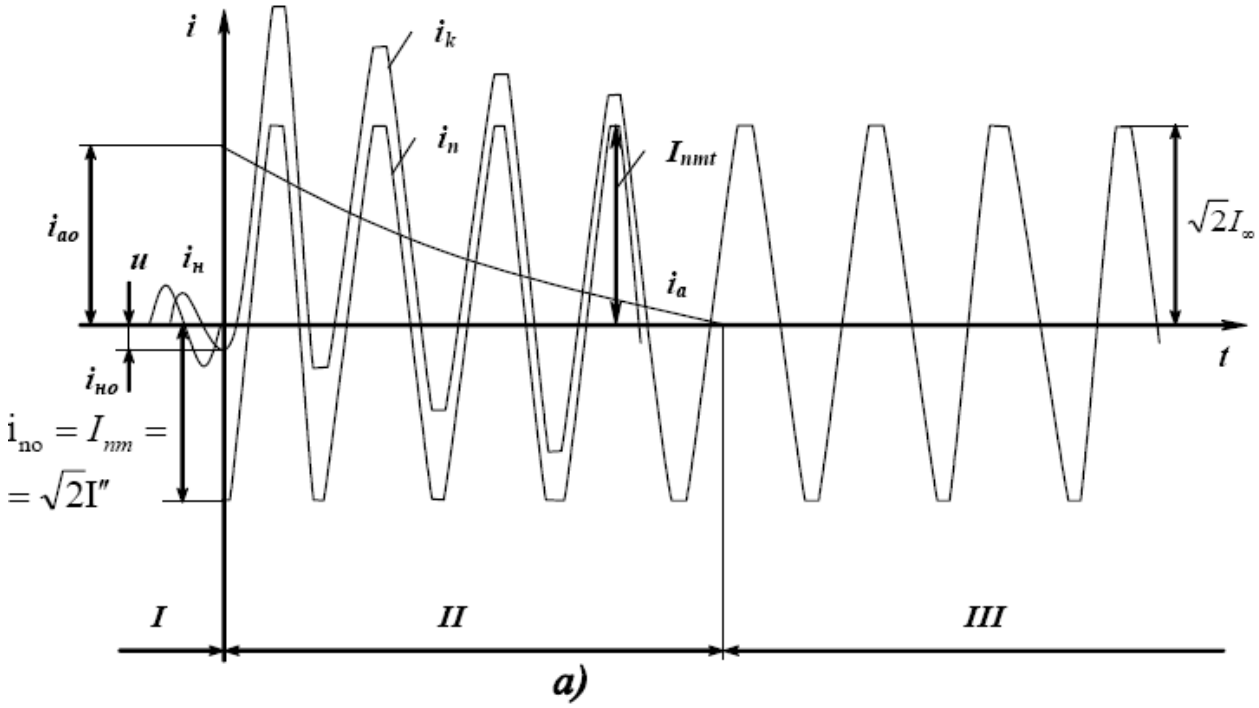


Рисунок 3,а. - Процес протікання струмів трифазного короткого замикання у системі необмеженнної потужності:
іп, Іп макс — миттєве й максимальне значення періодичної складової струму КЗ: І — діюче значення періодичної складової струму КЗ; іа — миттєве значення аперіодичної складової струму КЗ; ік — миттєве значення струму КЗ; і∞ — діюче значення сталого струму КЗ

При КЗ у системі, що живиться від електростанції обмеженої потужності, періодичний струм при незначному віддаленні точки КЗ від джерела електроенергії змінюється за гармонійною кривою з загасаючими за часом амплітудами від найбільшого значення до сталого, рівного $\sqrt{2}I_\infty$. (рис. ,б). Зменшення амплітуд струму ік обумовлено зменшенням у процесі короткого замикання ЕРС генератора внаслідок розмагнічуючої дії реакції якоря.

Генератори на сучасних електростанціях обладнані системами автоматичного регулювання напруги (АРН). Наявність АРН відображається на характері зміни періодичного струму КЗ (рис. 3,в). Внаслідок зменшення напруги на генераторах електростанції система АРН вступає в дію приблизно через 0,2с після початку КЗ. Це приводить до збільшення струму збудження та напруги на генераторах. У результаті амплітуда періодичного струму КЗ зростає.

У процесі КЗ аперіодична складова загасає. З урахуванням умов, при яких отримане рівняння (4), аперіодична складова змінюється за законом

$$i_a = i_{a\,макс} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{n\,макс} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{n\,макс}\alpha_t ,$$

де $T_a = \frac{L}{R} = \frac{X}{314R}$ — постійна часу загасання; L - індуктивність кола КЗ; R, X — активний і індуктивний опір кола КЗ; α_t — коефіцієнт загасання.

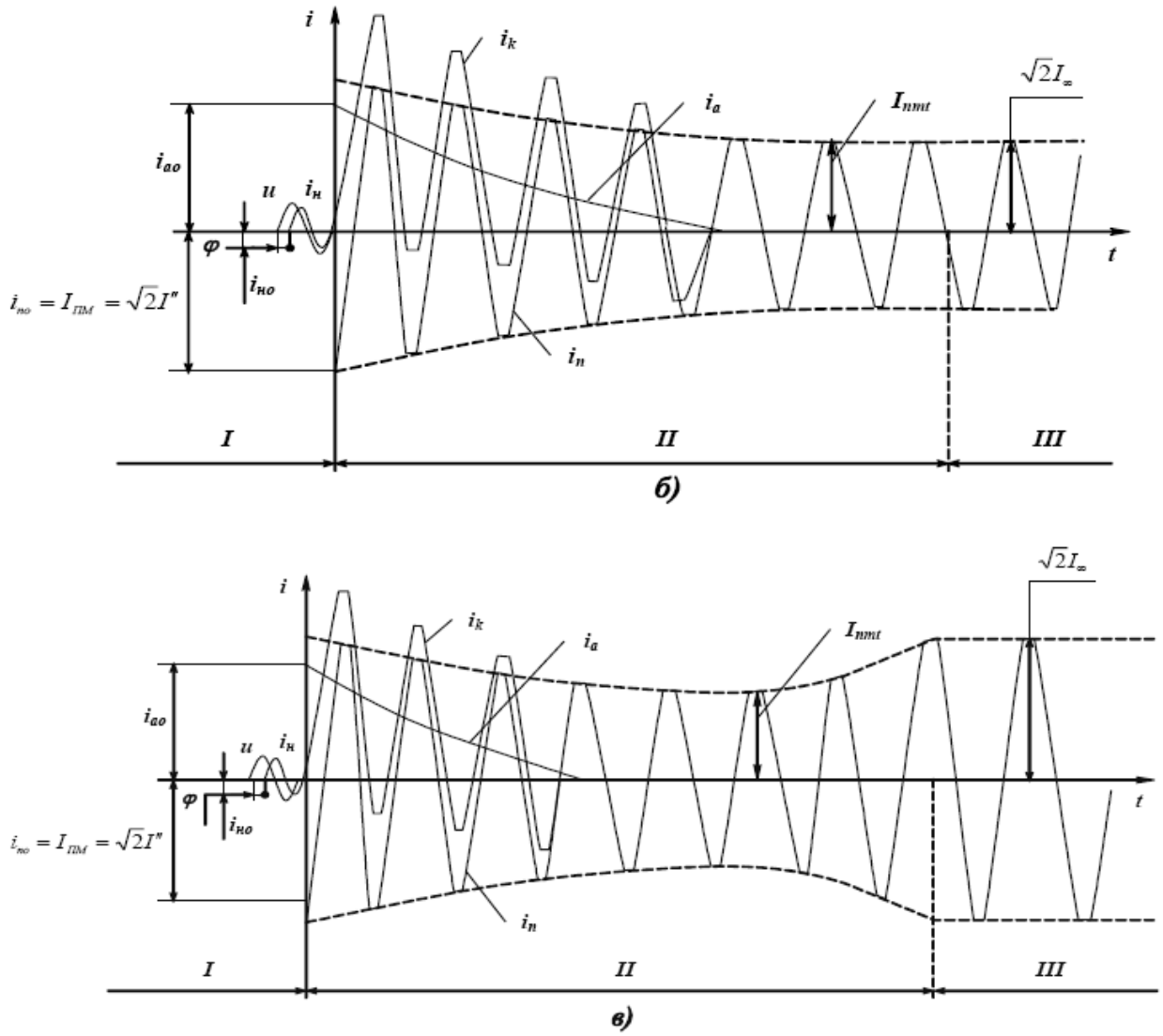


Рисунок - 3, б-в. Процес протікання струмів трифазного короткого замикання у системі обмеженої потужності без автоматичного регулювання напруги синхронних генераторів (б) і з синхронними генераторами, обладнаними автоматичним регулюванням напруги (в).

Величина динамічного впливу струму КЗ визначається значенням ударного (найбільшого) струму. Ударний струм проявляється приблизно через півперіоду (0,01с) від початку КЗ і дорівнює сумі значень аперіодичного і періодичного струмів. Для практичних розрахунків величину ударного струму КЗ іу визначають за співвідношенням

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'',$$

$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ — ударний коефіцієнт струму КЗ.

Ударний коефіцієнт враховує участь аперіодичного струму в утворенні ударного струму. Граничні значення ударного коефіцієнта залежать від значень активного та індуктивного опорів кола КЗ. Для кіл, що містять лише індуктивний опір (R=0), Ку = 2, тобто у таких ланцюгах періодичний струм не загасає. У ланцюгах тільки з активним опором (X = 0) Ку = 1, і періодичний струм не виникає. У практичних розрахунках приймають Ку = 1,8 (тобто Та = 0,05 с і t = 0,01 с), а величину ударного струму $i_y = 2,55I''$.

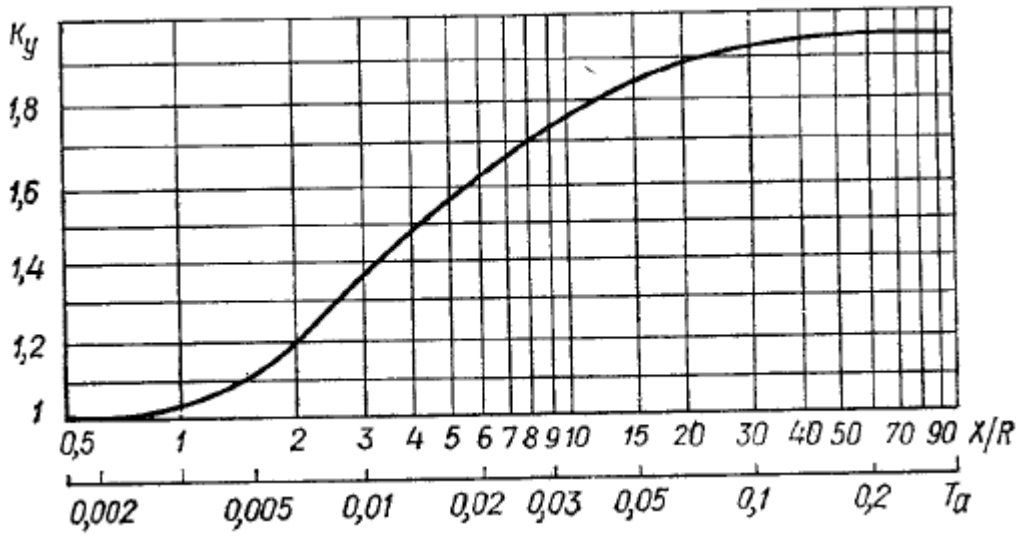


Рисунок 4. - Крива для визначення ударного коефіцієнту.

При розрахунку іу для точок, віддалених від джерела живлення, значення ударного коефіцієнта визначається за кривою $K_y = \varphi(T_a)$ (рис. 4). Діюче значення струму КЗ для довільного моменту часу

$I_{кt} = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}$.

Діюче значення ударного струму КЗ для моменту часу t = 0,01 с після початку КЗ

$I_y = \sqrt{I_{nt=0,01}^2 + I_{at=0,01}^2}$, або $I_y = I''\sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}$.

При Ку = 1,8 значення ударного струму КЗ буде: $I_y = 1,52I''$.

5. Розрахункові схеми

На першому етапі розрахунку аварійних режимів з КЗ на основі принципової схеми СЕП складають розрахункову схему. Принципова схема СЕП повинна відповідати попередньому нормальному режиму експлуатації з

найбільшим числом включених джерел живлення і підживленням точок КЗ у можливих аварійних режимах.

Розрахункова схема відповідає аварійним режимам СЕП і на ній в однолінійному зображенні показують джерела СЕП, точки КЗ і всі силові елементи, якими можливе протікання струму КЗ або його складових, тобто генератори, синхронні компенсатори, статичні джерела реактивної потужності, маловіддалені від точок КЗ узагальнені навантаження, силові трансформатори і автотрансформатори, реактори, повітряні (ПЛ) і кабельні (КЛ) лінії, що зв'язують джерела живлення із точками КЗ. У розрахунковій схемі враховують електродвигуни як джерела підживлення точок КЗ при їх невеликій електричній віддаленості та сумарній потужності (або кожного окремо) 1000 кВ·А та більше.

Під електричною віддаленістю точки КЗ від джерела живлення або підживлення розуміють наведений до номінальної потужності та номінальної напруги джерела сумарний опір короткозамкненого кола у відносних одиницях (при його значенні, більшому трьох, КЗ вважається віддаленим, а при значенні, меншому або рівному трьом,— маловіддаленим). Віддаленість точки КЗ можна оцінити відношенням струму джерела в початковий момент часу КЗ до його номінального струму. КЗ маловіддалене, якщо це відношення дорівнює або більше одиниці. У противному разі КЗ є віддаленим.

Залежно від постановки завдання на схемі намічають кілька розрахункових точок КЗ і вказують види КЗ. Кінцевою метою розрахунків може бути визначення як максимальних (для перевірки електроустаткування на стійкість до струмів КЗ), так і мінімальних (для перевірки релейного захисту) значень аварійних струмів, а також залишкових напруг у різних точках мережі. Тому на етапі складання розрахункової схеми з'ясовують розрахункові умови: які її елементи повинні бути включені; де повинні бути розташовані точки КЗ; який вид КЗ і яким повинен бути прийнятий розрахунковий момент часу КЗ для одержання відповідних значень параметрів розрахункового аварійного режиму. Розрахунковому режиму надається змістове значення, виходячи з кінцевої мети розрахунку струму КЗ. При перспективних розрахунках СЕП максимальні режими КЗ варто визначати з урахуванням розвитку мережі.

Кожний елемент розрахункової схеми характеризується відповідними параметрами. Для синхронного генератора — це номінальна повна Sном або активна Рном потужність; номінальний коефіцієнт потужності cosφном; номінальна напруга Uном; зверхперехідний реактивний опір x*d реактивний опір зворотної послідовності x*2; постійна часу загасання аперіодичної складової струму трифазного КЗ Та. Значення цих параметрів у випадку турбо- і гідрогенераторів приводяться в паспортних даних. Еквівалентне джерело живлення може бути отримане об'єднанням декількох генераторів із

сумарною номінальною потужністю $S_{\Sigma ном}$ і результуючим зверхперехідний опором x''_c.

Якщо СЕП живиться від потужної ЕЕС, то зв'язок з нею може бути задано струмом або потужністю КЗ. При відсутності цих даних наближений розрахунок виконують за граничним струмом відключення вимикачів, установлених на шинах зв'язку з ЕЕС, вважаючи, що струм або потужність при трифазному КЗ безпосередньо за вимикачем рівні відповідно до його номінального відключаємого струму Іоткл.ном або номінальної відключаємої потужності Sоткл.ном при заданій напрузі. Якщо в розглянутому вузлі перебуває місцева станція, що створює при КЗ струм I''_{cm} або потужність S''_{cm}, варто виходити зі значення струму $I_{откл.ном} - I''_{cm}$ або потужності $S_{откл.ном} - S''_{cm}$. На основі цих параметрів знаходять опір енергетичної системи x_c.

6. Схеми заміщення і їх перетворення

Схему заміщення СЕП становлять на основі її розрахункової схеми для початкового моменту перехідного процесу (джерела заміщаються зверперехідними ЕРС і опорами). Її компонують для кожної точки КЗ і в неї включають елементи розрахункової схеми, за якими можливе протікання струму КЗ або його складових до даної точки КЗ. Перехід від розрахункової схеми до схеми заміщення зводиться до заміни розрахункової схеми еквівалентним електричним колом, що включає в себе джерела ЕРС і незмінні опори, та до приведення параметрів елементів і ЕРС різних ступіней СЕП до базисних умов (до одної ступені напруги, обраної за основну).

Схема заміщення СЕП являє собою сукупність схем заміщення її окремих елементів, з'єднаних між собою у тій же послідовності, що й на розрахунковій схемі. При цьому трансформаторні зв'язки в розрахунковій схемі заміняють електричними - елементи з магнітозв’язаними колами вводять у схему заміщення у вигляді відповідних еквівалентних електричних опорів. Доцільно позначати опори у вигляді дробу: у чисельнику - арабськими цифрами порядковий номер елемента, у знаменнику - значення його опору. На схемі заміщення вказують всі джерела живлення і точку КЗ.

Для віддалених станцій, схеми яких невідомі, варто приймати схему блоку генератор - трансформатор, вважаючи потужність такого блоку рівною потужності всієї станції. Потужні джерела рекомендується вводити в схему як джерела необмеженої потужності.

Опори електроапаратів (вимикачів, роз'єднувачів та ін.), а також сполучних кабелів і шин у розподільних пристроях не враховують внаслідок їх невеликого значення. Активний опір кола КЗ доцільно враховувати при дотриманні умови

$$r_{рез} \succ \frac{1}{3} x_{рез},$$

де хрез, rрез- результуючи індуктивний і активний опори кола КЗ.

На розрахунковій схемі намічають розрахункові точки КЗ. Якщо струм КЗ визначають для перевірки електроустаткування на стійкість при КЗ, то розрахункові точки повинні бути намічені так, щоб по обираному електроустаткуванню протікав найбільший можливий струм КЗ при заданому режимі роботи установки. При цьому виходять з одночасної паралельної роботи всіх генераторів (станцій) системи як працюючих, так і резервних.

За розрахунковою схемою складають в однолінійному зображенні схему заміщення для обраної точки КЗ. Поступовим перетворенням схему заміщення приводять до одного еквівалентного елемента, що має результуючий опір хрез або zрез від джерела (джерел) живлення до точки КЗ.

Основні способи спрощення схеми заміщення:

1. Заміна паралельно, послідовно або змішано включених опорів елементів одним еквівалентним.

2. Перетворення трикутника в еквівалентну зірку або навпаки (рис. 5). Формули перетворення для переходу від трикутника з'єднання опорів до зірки:

$$x_1 = \frac{x_{12}x_{13}}{x_{12}+x_{13}+x_{23}};\ x_2 = \frac{x_{12}x_{23}}{x_{12}+x_{13}+x_{23}};\ x_3 = \frac{x_{13}x_{23}}{x_{12}+x_{13}+x_{23}};$$

для переходу від зірки з'єднання опорів до трикутника:

$$x_{13} = x_1 + x_3 + \frac{x_1 x_3}{x_2}; \qquad x_{23} = x_2 + x_3 + \frac{x_2 x_3}{x_1};$$

3. Заміна двох або декількох джерел живлення одним еквівалентним (наприклад, об'єднання двох електростанцій). Така заміна можлива лише у випадку, коли джерела живлення перебувають приблизно в однакових умовах стосовно місця КЗ. Для систем електропостачання потужних підприємств характерна схема спільного живлення від системи S1 і електростанції підприємства S2. Об'єднання однойменних джерел живлення припустимо за умови, що Ks = 0,4 ÷ 2,5. Величина Ks визначається виразом

$$K_s = \frac{S_1 x_1}{S_2 x_2},$$

де x1, x2— опори від джерел S1 і S2 до точки КЗ.

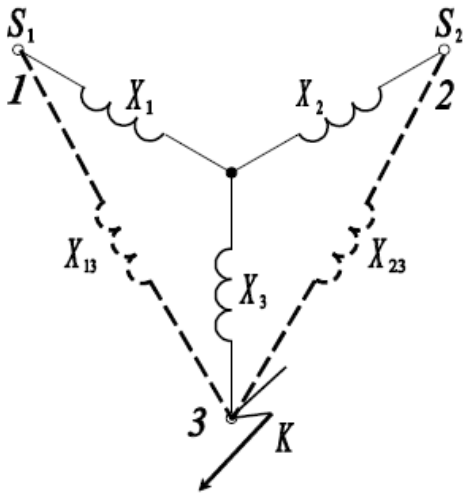


Рисунок 5 - Перетворення схеми заміщення із двома джерелами

Якщо в кожному з поєднуваних кіл розрахунковий опір кола $x_{*расч} > 3$, то об'єднання кіл джерел припустимо у всіх випадках. Неможна поєднувати гілку джерела живлення з незмінною ЕРС і гілку джерела живлення з розрахунковим опором $x_{*расч} < 3$, тому що методи розрахунку струмів КЗ цих джерел різні.

4. Зневага малопотужними віддаленими джерелами живлення (синхронні компенсатори, синхронні або асинхронні двигуни). Джерелом живлення меншої потужності можна зневажити якщо одночасно виконуються умови

$$\frac{x_2}{x_1} \geq 20 \quad \text{і} \quad \frac{S_2}{S_1} \leq 0{,}05,$$

де S2 - потужність меншого джерела живлення.

При спрощенні схеми варто дотримуватися певного порядку послідовності операцій і запису результатів розрахунку. До початку перетворень рекомендується встановити наявність у схемі точок однакового потенціалу, при сполученні яких схема значно спрощується.

Складання схеми заміщення в практичних розрахунках зводиться до приведення параметрів всіх елементів різних ступіней трансформації розрахункової схеми до однієї (базисної) ступіні, обраної за основну. При цьому варто мати на увазі, що розрахунок може бути виконаний в іменованих і відносних одиницях. Частіше виконують розрахунки у відносних одиницях.

Розрахунок в іменованих одиницях. Тому що розрахункова схема має кілька ступіней різних напруг, то опори всіх елементів кола КЗ повинні бути приведені до однієї базисної напруги Uб. За базисну напругу приймають середню номінальну напругу того електричного ступіня, для якого визначається струм КЗ Шкала середніх номінальних напруг:

515; 340; 230; 158; 115:37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3 кВ.

Опори елементів кола, приведені до базисної напруги:

а) заданий опір в омах на фазу

$$x_б = x \cdot \frac{U_б^2}{U_{ср}^2},$$

де Ucp — середня номінальна напруга того ступіня, у колі якого включене даний опір;

б) заданий опір у відносних одиницях

$$x_б = x_{*_н} \cdot \frac{U_б^2}{S_н},$$

де Sн — номінальна потужність елемента схеми.

Розрахунок у відносних одиницях. Опори всіх елементів приводять до базисної потужності Sб. Величину базисної потужності варто вибирати в кожному конкретному випадку, виходити з міркувань скорочення обчислень. Звичайно за базисну потужність приймають потужність живильної системи, електростанції, трансформаторів підстанції або зручне для розрахунків число, кратне 10 (100 кВ·А, 1000кВ·А и т.д.). Базисні величини зв'язані умовою

$$S_б = \sqrt{3} U_б I_б .$$

Опори елементів кола, приведені до базисної потужності Sб:

а) опір заданий у відносних одиницях або у відсотках

$$x_{*б} = x_{*_н} \cdot \frac{S_б}{S_н} \quad \text{або} \quad x_{*б} = \frac{x_н}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н};$$

б) опір заданий в омах

$$x_{*б} = x \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2}.$$

7. Опори елементів кола короткого замикання

Опори генераторів, синхронних компенсаторів, синхронних і асинхронних двигунів

$$x_{*_г} = x''_{*d} \cdot \frac{S_б}{S_н} \quad \text{або} \quad x_{*_г} = \frac{x''_d S_б}{100 S_н},$$

де x''_{*d} й x''_d — зверперехідний реактивний опір у поздовжній осі; Sн — номінальна потужність машини.

Значення x''_{*d} для різних машин:

турбогенератор потужністю до 100 МВт - 0,125;

те ж, потужністю 100-500 МВт - 0,2;

гідрогенератор із заспокійливими обмотками - 0,2;

те ж, без заспокійливих обмоток - 0,27;

синхронні компенсатори, синхронні й асинхронні двигуни - 0,2

Активні опори цих елементів не враховують.

Опори силових трансформаторів і автотрансформаторів. Для двообмоткових трансформаторів (при Sн ≥ 630 кВ·А) відносний опір х* відповідає напрузі КЗ, віднесеного до номінальних умов (U*к =0,01 Uк). Тому

$$x_{*m} = \frac{U_к}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н}.$$

При номінальній потужності трансформаторів Sн < 630 кВ*А, для яких ураховується відносний активний опір r_{*m},

$$x_{*m} = \sqrt{U_{*к}^2 - r_{*mн}^2}\,\frac{S_б}{S_н},\ r_{*mн} = \frac{\Delta P_м}{S_н},$$

де ΔРм — втрати в міді трансформатора.

Активний опір трансформатора, віднесений до базисної потужності

$$r_{*m} = r_{*mн} \cdot \frac{S_б}{S_н}$$

На схемі заміщення трансформатор зображується у вигляді послідовно з'єднаних індуктивного та активного (якщо враховується) опорів. Для триобмоткових трансформаторів напруги КЗ, приведені до номінальної потужності трансформатора, дані для кожної пари обмоток Uкв-н, Uкв-с, Uкс-н. Відносні опори променів схеми заміщення, зображеної на рис. 6:

$$\left\{\begin{aligned} x_{*в} &= \frac{0,5}{100}\left(U_{кв-с} + U_{кв-н} - U_{кс-н}\right)\frac{S_б}{S_{н.в}};\\ x_{*с} &= \frac{0,5}{100}\left(U_{кв-с} + U_{кс-н} - U_{кв-н}\right)\frac{S_б}{S_{н.с}};\\ x_{*н} &= \frac{0,5}{100}\left(U_{кв-н} + U_{кс-н} - U_{кв-с}\right)\frac{S_б}{S_{н.н}};\end{aligned}\right\}$$

де $S_{н.в}$, $S_{н.с}$, $S_{н.н}$ — номінальні, потужності обмоток вищої, середньої й нижчої напруг.

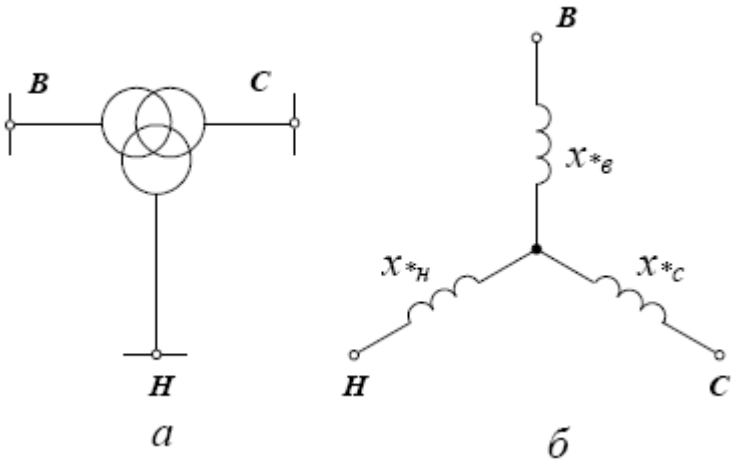


Рисунок 6 – Триобмотковий трансформатор (а) та його схема заміщення (б).

Для автотрансформаторів звичайно відомі напруги КЗ між обмотками вищої й середньої напруг Uкв-з, віднесені до номінальної потужності автотрансформатора Sан, і напруги КЗ між обмотками вищої й нижчої напруг $U'_{кв-н}$, середньої та нижчої напруг $U'_{кв-н}$, віднесені до типової потужності автотрансформатора Sат:

$$S_{ат} = \alpha S_{ан}; \qquad \alpha = 1 - \frac{U_c}{U_в}.$$

Відомі напруги КЗ приводять до номінальної потужності:

$$U_{кв-н} = U'_{кв-н} \cdot \frac{S_{ан}}{S_{ат}}; \qquad U_{кс-н} = U'_{кс-н} \cdot \frac{S_{ан}}{S_{ат}}.$$

Схема заміщення має вигляд трипроменевої зірки.

У трансформаторах або автотрансформаторах з розщепленими n обмотками потужність кожної обмотки дорівнює 1/n номінальної потужності трансформатора. Однофазний або трифазний двообмотковий трансформатор, у якого обмотка нижчої напруги розщеплена на n, показаний на рис. 7,а. При паралельній роботі обмоток Н1, Н2 ...Hn трансформатор має наскрізний реактивний опір $x_{*скв}\frac{u_{кв-н}}{100}$ (рис.7,б, ліворуч). При роздільній роботі обмоток параметри елементів схеми заміщення (рис. 7,б, праворуч):

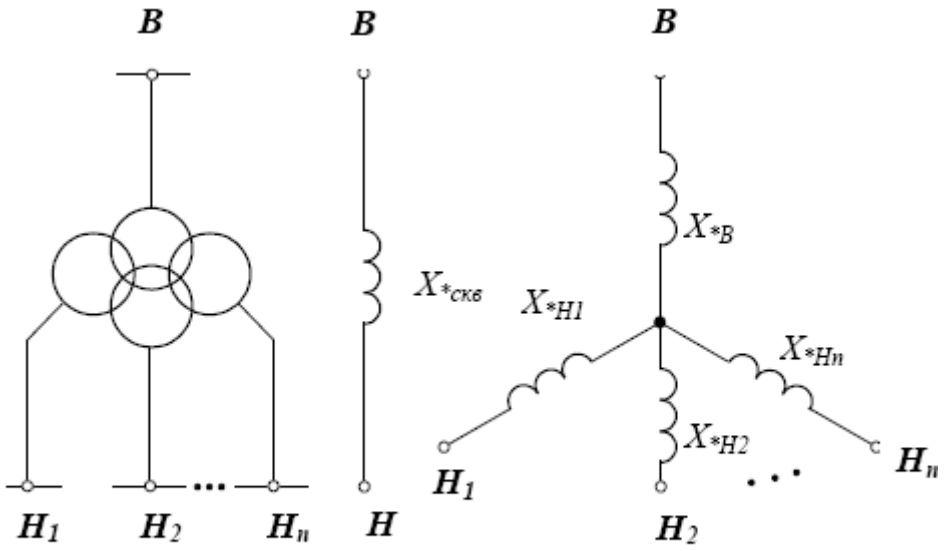
$$x_{*в} = \left(\frac{u_{кв-н}}{100} - \frac{x_{*расщ}}{2n}\right)\frac{S_б}{S_н}; \quad x_{*н_1} = x_{*н_2} = \cdots = x_{*н_n} = \frac{x_{*расщ}}{2} \cdot \frac{S_б}{S_н},$$

де $x_{*расщ}$ — реактивний опір розщеплення, що визначається за напругою КЗ між двома розщепленими обмотками, тобто

$$x_{*расщ} = \frac{u_{кн1-н2}}{100} \quad \text{або} \quad x_{*расщ} = K_{расщ} \cdot \frac{u_{кв-н}}{100}.$$

Для однофазних двообмоткових трансформаторів коефіцієнт розщеплення Красщ = 2n; тоді

$$x_{*в} = 0;\ x_{*н1} = x_{*н2} = \cdots = x_{*н_n} = n \cdot \frac{u_{кв-н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н}.$$



а) *б)*

Рисунок 7 – Двообмотковий трансформатор з розщепленою обмоткою (а) та його схема заміщення (б)

Для трифазних двообмоткових трансформаторів коефіцієнт розщеплення Красщ ≈ 3,5. Схема заміщення трифазного трансформатора при n = 2 має вигляд трипроменевої зірки з параметрами

$$x_{*в} = 0{,}125\frac{u_{кв-н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н}; \qquad x_{*н1} = x_{*н2} = 1{,}75\frac{u_{кв-н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_н}.$$

Для триобмоткового трансформатора або автотрансформатора опорі елементів схеми заміщення (рис. 7):

$$x'_{*н} = \left(x_{*н} - \frac{x_{*расщ}}{4} \right) \cdot \frac{S_б}{S_н}; \qquad x_{*н1} = x_{*н2} = \cdots = x_{*н_n} = \frac{x_{*расщ}}{2} \cdot \frac{S_б}{S_н};$$

$$x_{*расщ} = 4\left(x_{*н} + \frac{x_{*в} x_{*с}}{x_{*в} + x_{*с}} \right).$$

Опори реакторів. Схема заміщення звичайного реактора - реактивний опір, включений у короткозамкнене коло. Відносний опір реактора, приведений до базисних умов,

$$x_{*p} = \frac{x_p}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{н.р}}{U_б},$$

де хр - індуктивний опір реактора, віднесене до номінальних умов; Uн.р - номінальна напруга реактора; Ін.р. - номінальний струм реактора.

Значення хр, Uн.р і Ін.р наведені в каталогах.

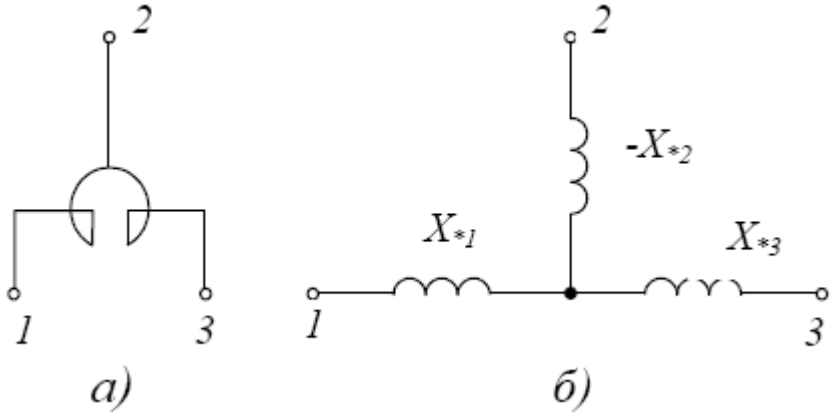


Рисунок 8 - Здвоєний реактор та його схема заміщення

Параметрами здвоєного реактора (рис. 8) є індуктивний опір його гілок і коефіцієнт зв'язку (Кзв = 0,4 - 0,6) між гілками, які наведені в каталогах. Відносний опір реактора, наведений до базисних умов, визначається залежно від місця КЗ і розташування реактора в розрахунковій схемі. Якщо джерела живлення підключені з боку виводу 2, а КЗ відбудеться з боку 1 або 3, то відносний опір реактора визначають так само, як і звичайного реактора. При підключенні джерела живлення з боку 1 або 3 і КЗ на виводах 3 або 1 відносний опір реактора

$$x_{*p} = \frac{2(1 + k_{зв})x_p}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{н.р}}{U_б}.$$

Якщо джерела живлення підключені з боку 1 і 3, а КЗ відбулося на виводах 2, відносний опір реактора

$$x_{*p} = \frac{(1 - k_{св})x_p}{200} \cdot \frac{I_б}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{н.р}}{U_б}.$$

У цих випадках схема заміщення реактора - у вигляді одного опору.

При КЗ за межами виводів 1, 2, 3, до яких підключені джерела живлення (рис. 8), відносні опори променів схеми заміщення реактора

$$x_{*1} = x_{*3} = \frac{(1 + k_{св})x_p}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{н.р}}{U_б}; \quad x_{*2} = -\frac{k_{св}x_p}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{н.р}}{U_б}.$$

Опори повітряних і кабельних ліній, шинопроводов. Відносний активний і індуктивний опори ліній

$$r_{*л} = r_0 l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2}; \qquad x_{*л} = x_0 l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2},$$

де r0, x0 — активний і індуктивний опори 1 км лінії (шинопроводу), Ом/км; l -довжина лінії (шинопроводу), км.

Величину r0 знаходять з довідкових матеріалів або визначають за формулами: для лінії й шинопровода відповідно:

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma s}, \qquad r_{0ш} = \frac{1000}{\gamma s}\left[1 + \alpha t(\theta_1 - \theta_2)\right](k_{д.п} + k_к)$$

де γ - розрахункова питома провідність проводів (для шино проводу при θ1 =20°С); для мідних проводів γ = 53 м/(Ом*мм2); для алюмінієвих — γ = 32 м/(Ом*мм2); s - переріз провода (шини) однієї фази; αt - температурний коефіцієнт зміни опору (для міді й алюмінію αt =0,004); θ2 — температура, за якою визначається опір провідника; kд.п - коефіцієнт додаткових втрат, що враховує вплив поверхневого ефекту й ефекту близькості; kк - коефіцієнт, що враховує збільшення опору шинопроводу за рахунок втрат у металевих конструкціях.

Середні значення X0л (в Ом/км) становлять:

для одноланцюгової повітряної лінії 6-220 кВ - 0,4;

те ж, до 1 кВ - 0,3;

для одноланцюгової повітряної лінії 220-500 кВ

при розщепленні на два проведення у фазі - 0,32;

для трижильного кабелю 35 кВ - 0,12;

те ж, 6-10 кВ - 0,08;

те ж, до 1 кВ - 0,07.

При розташуванні осей шин за рівностороннім трикутником реактивний опір

$$x_{0ш1} = x_{0ш2} = x_{0ш3} = 628\left(\ln\frac{d}{g}\right)10^{-4},$$

де d - відстань між осями фаз; g - середньогеометрична відстань площі поперечного переріза пакета шин.

При розташуванні осей шин в одній площині (вертикально або горизонтально) і відстанях між осями фаз 1-2 і 2-3, рівних d, а між осями 1-3, рівних 2d:

$$x_{0ш1} = x_{0ш3} = 628\left(\ln\frac{d}{g} + 0{,}346\right)10^{-4}, \quad x_{0ш2} = 628\left(\ln\frac{d}{g}\right)10^{-4}.$$

Опір до шин понижувальної підстанції (опір системи) при відомій потужності КЗ Sк на шинах знижувальної підстанції, що входить у загальне коло КЗ

$$x_{*n} = \frac{S_б}{S_к} \quad \text{або} \quad x_n = \frac{U^2_{ср.к}}{S_к},$$

де Uср.к - середня напруга того ступіня, де відома потужність Sк.

За цим опором вважають підключеним джерело необмеженої потужності.

8. Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів КЗ необхідний: для вибору й перевірки електроустаткування та струмоведучих частин, для вибору засобів обмеження аварійних струмів, для проектування й настроювання пристроїв захисту й автоматики. Точність розрахунку струмів КЗ залежить від його призначення. Так, для вибору електричних апаратів досить наближене визначення струмів КЗ. Для вибору й настроювання захисту й автоматики точність розрахунків значно вище.

При розрахунках струмів КЗ визначають: початковий зверхперехідний струм КЗ I'' ударний струм КЗ іу - для перевірки електричних апаратів, шин і ізоляторів на динамічну стійкість; найбільше діюче значення повного струму КЗ Іу - для перевірки електричних апаратів на стійкість протягом першого періоду процесу КЗ; сталий струм КЗ I∞, - для перевірки електричних апаратів шин, ізоляторів і кабелів на термічну стійкість; діюче значення повного струму КЗ Ікt - для вибору вимикачів високої напруги й настроювання релейного захисту; потужність короткого замикання Skt - для перевірки вимикачів за гранично припустимою потужністю, що відключається.

Порядок розрахунку струмів КЗ:

- на основі принципової схеми електропостачання складають розрахункову схему і вказують точки КЗ;
- складають еквівалентні схеми заміщення (для кожної точкі КЗ окремо);
- вибірають базісні величини;
- визначають опори всіх елементів схеми заміщення;
- послідовним спрощенням схеми заміщення визначають результуючий опір до точки КЗ;
- розраховують струми КЗ з урахованням потужності джерела.

Порядок розрахунку струмів КЗ:

- на основі принципової схеми електропостачання складають розрахункову схему і вказують точки КЗ;
- складають еквівалентні схеми заміщення (для кожної точкі КЗ окремо);
- вибірають базісні величини;
- визначають опори всіх елементів схеми заміщення;
- послідовним спрощенням схеми заміщення визначають результуючий опір до точки КЗ;

- розраховують струми КЗ з урахованням потужності джерела.

Розрахунок струмів КЗ від джерела необмеженої потужності.

Діюче значення періодичного струму трифазного КЗ для будь-якого моменту часу

$$I''^{(3)} = I_{nt}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = \frac{U_{б}}{\sqrt{3}\, z_{рез}}, \text{ або } \quad I''^{(3)} = I_{nt}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = \frac{I_{б}}{Z_{*рез}},$$

де Zрез, Z*рез — відповідно повний результуючий опір кола КЗ в іменованих і відносних одиницях, приведений до базисних умов і отриманий в результаті спрощення схеми заміщення. Базисний струм Іб визначають, виходячи з обраної базисної потужності Sб

$$I_{б} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{б}}.$$

При $r_{*рез} \prec \frac{1}{3} x_{*рез}$ струм КЗ $I''^{(3)} = I_{nt}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = \frac{I_{б}}{x_{*рез}}.$

Потужність КЗ

$$S''^{(3)} = S_{nt}^{(3)} = S_{\infty}^{(3)} = \frac{U_{б}^{2}}{x_{рез}} \quad \text{або} \quad S''^{(3)} = S_{nt}^{(3)} = S_{\infty}^{(3)} = \frac{S_{б}}{x_{*рез}}.$$

Розрахунок струмів КЗ від джерела обмеженої потужності.

Якщо точка КЗ перебуває поблизу джерела живлення (на шинах електростанції або на лінії), то періодичний струм КЗ визначають за розрахунковими кривими, побудованими для типових гідрогенераторів (рис. 9,а) і турбогенераторів (рис.9,б).

Розрахункові криві представляють залежність зміни відносної величини періодичної складової струму I*пt у місці КЗ для довільного моменту від різного розрахункового опору схеми х*расч. Значення струму й опори виражені при номінальних умовах генератора. Розрахункові криві враховують вплив навантаження джерела, умовно віднесеного до його затискачів. Тому у величину х*расч навантаження не входить, що дозволяє в схемі заміщення виключити навантаження та ураховувати тільки елементи кола КЗ. У міру віддаленості КЗ (збільшення розрахункової реактивності) розходження між струмами в часі стає, менше. Тому при х*расч > 3 періодична складова струму дорівнює своєму початковому значенню. Слід також зазначити, що при х*расч > 1 розрахункові криві для генераторів різних типів майже збігаються.

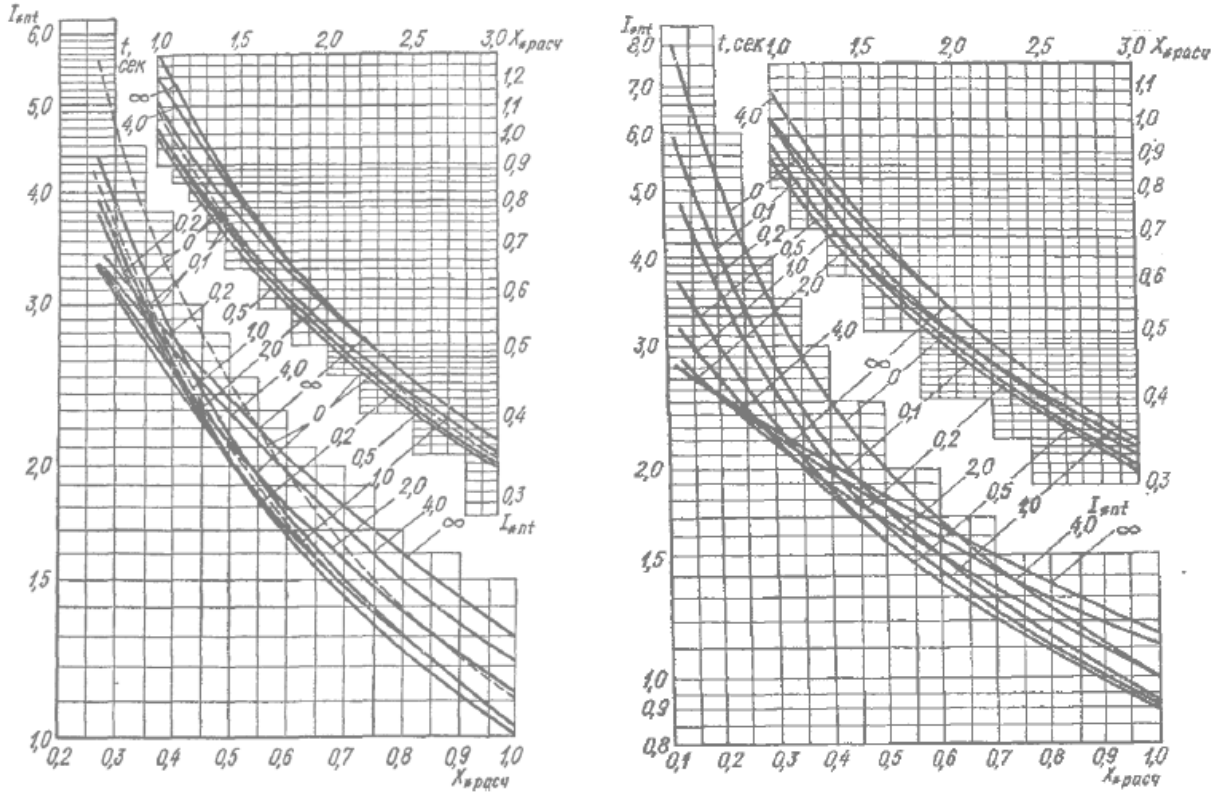


Рисунок 9 - Розрахункові криві для типового:
а) гідрогенератора с АРЗ; б) турбогенератора с АРЗ.

Розрахунковий опір визначається по значенню вже розрахованого результуючого опіру до точкі КЗ, тобто результуючий опір приводять до потужності джерела живлення Sном.Σ:

$$x_{*расч} = x_{*рез} S_{ном.\Sigma} / S_{б}\,.$$

Далі по кривим (рис.7) визначають відповідні відносні значення аварийних струмів(I_{*nt}) для потрібного моменту часу t та разраховують їх значення в іменованих одиницях:

$$I^{"(3)} = I_{*nt=0} \cdot I_{ном\Sigma}\,,\quad I_{\infty}^{(3)} = I_{*nt=\infty} \cdot I_{ном\Sigma}\,,\quad I_{nt}^{(3)} = I_{*nt} \cdot I_{ном\Sigma}\,,$$

$$S^{"(3)} = I_{*nt=0} \cdot S_{ном\Sigma}\,,\quad S_{\infty}^{(3)} = I_{*nt=\infty} \cdot S_{ном\Sigma}\,,\quad S_{nt}^{(3)} = I_{*nt} \cdot S_{ном\Sigma}\,,$$

де $I_{nt}^{(3)} = I_{*nt} \cdot I_{ном\Sigma} = S_{ном\Sigma} / (\sqrt{3} U_{б})\,.$

9. Розрахунок струмів КЗ від двигунів. (сам. роб.)

10. Розрахунок струмів КЗ для вибору вимикачів. (сам. роб.)

11. Несиметричні коротки замикання. (сам. роб.)

12. Розрахунок струмів КЗ у мережах напругою до 1000 В. (сам. роб.)

13. Особливості розрахунку струмів КЗ для релейного захисту й автоматики. (сам. роб.)

14. Нагрівання струмоведучих частин струмами КЗ

В основу розрахунку нагрівання струмоведучих частин при коротких замиканнях покладені наступні допущення:

а) процес нагрівання провідників уважають адіабатним, тобто такім, що протікає без розсіювання тепла в навколишнє середовище, через короткочасність цього режиму;

б) теплову дію аперіодичної складової струму короткого замикання через короткочасність її існування не враховують.

При зазначених умовах диференціальне рівняння теплового балансу має вигляд

$$I^2 \frac{\rho l}{s}\left[1+\alpha\left(\vartheta-20\right)\right]dt = c\left[1+\beta\left[\vartheta-20\right]\right]gsld\vartheta,$$

де c - питома теплоємність матеріалу при 20° С; . - температурний коефіцієнт зміни теплоємності; g - щільність матеріалу.

Ліва частина рівняння виражає кількість тепла, виділюваного в провіднику за нескінченно малий проміжок часу dt, а права частина - кількість тепла, затрачуваного за те же час на нагрівання провідника.

Після поділу змінних рівняння приймає вид

$$\frac{1}{s^2} I^2 dt = \frac{cg}{\rho} \frac{1+\beta\left(\vartheta-20\right)}{1+\alpha\left(\vartheta-20\right)} d\vartheta.$$

Для визначення нагрівання провідника за час існування режиму короткого замикання необхідно проінтегрувати ліву частину рівняння у границі від 0 до t, де t - момент відключення короткого замикання, а праву — у межах від початкової температури ϑ_0:, що провідник мав до короткого замикання, до кінцевої температури ϑ, яку він одержить до моменту відключення короткого замикання:

$$\frac{1}{s^2}\int_0^t I^2 dt = \frac{cg}{\rho}\int_{\vartheta_0}^{\vartheta} \frac{1+\beta\left(\vartheta-20\right)}{1+\alpha\left(\vartheta-20\right)} d\vartheta.$$

Розглянемо кожну з частин цього рівняння окремо. Інтегрування лівої частини рівняння представляє труднощі через відсутність аналітичного

вираження залежності величини струму короткого замикання від часу. Тому на практиці користуються спрощеним способом рішення, уводячи поняття про наведений час tп.п протікання короткого замикання.

Наведеним часом короткого замикання називають час, протягом якого сталий струм короткого замикання виділив би стільки ж тепла, скільки його виділяється при дійсному режимі протікання короткого замикання за час його існування. Із цього визначення слідує, що інтеграл у лівій частині формули може бути замінений відповідно до рівності

$$\int_0^t I^2 dt = I_{к\infty}^2 t_{п.п}.$$

Звідси наведений час протікання короткого замикання визначається формулою

$$t_{п.п} = \int_0^t \left(\frac{I}{I_{к\infty}} \right)^2 dt,$$

тобто залежить від характеру зміни струму короткого замикання й тривалості його існування. Як показує дослідження, кожна із кривих протікання короткого замикання характеризується своїм, властивим тільки їй, відношенням початкового значення струму короткого замикання до його сталого значення $\beta'' = I''/I_{\infty}$. Для практичного визначення наведеного часу за дійсним часом t при різних значеннях β'' служать криві, наведені на рис. 12. Ці криві є середніми для турбогенераторів і гідрогенераторів. Як слідує з кривих (рис. 12,а), наведений час при генераторах з автоматичним регулюванням напруги перевищує дійсний при більших значеннях β'', оскільки при цих умовах дійсний струм короткого замикання за увесь час існування короткого замикання перевищує сталий струм. При малих значеннях β'' має місце зворотне явище. При генераторах без автоматичного регулювання напруги наведений час завжди перевищує дійсний (рис. 12,б).

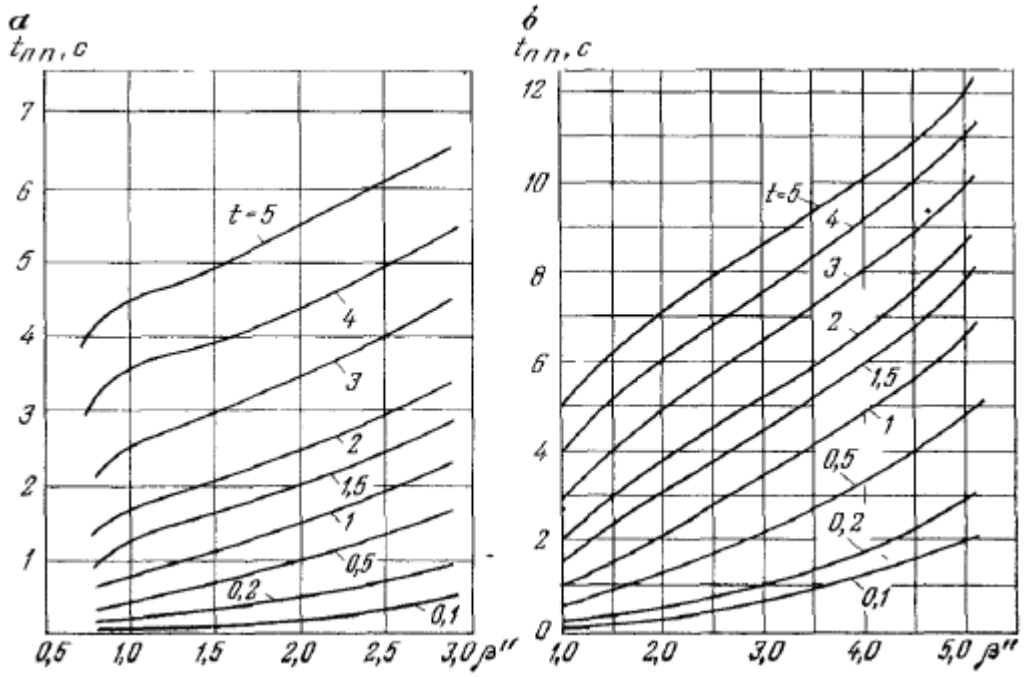


Рисунок 12 - Залежність приведеного часу дії струмів короткого замикания: а — при живленні від генераторів з автоматичним регулюванням напруги; б — при живленні від генераторів без автоматичного регулювання напруги;

При t < 1с враховують також теплову дію аперіодичної складової струму короткого замикання, додаючи до приведеного часу періодичної складової наведений час аперіодичної складової, що визначається за формулою

$$t_{n.nD} = 0{,}05(\beta'')^2 .$$

Права частина рівняння може бути легко проінтегрована, у результаті чого буде отримана різниця двох виразів, у перше з яких увійдуть постійні струмоведучого матеріалу й кінцева температура, а в друге — ті ж постійні й початкова температура. Таким чином, для кожного з струмоведучих матеріалів обидва члени правої частини рівняння, позначувані надалі A_ϑ й A_{ϑ_0}, є тільки функціями температури. Залежність величини A_ϑ від температури для найбільш уживаних струмоведучих матеріалів дана на рис. 13. Підстановка замість лівої й правої частин рівняння їхніх значень дає вираз

$$\frac{I_{к\infty}^2}{s^2} t_{п.п} = A_\vartheta - A_{\vartheta_0} ,$$

, звідки

$$s = \frac{I_{к\infty}\sqrt{t_{п.п}}}{\sqrt{A_\vartheta - A_{\vartheta_0}}} .$$

Відповідно до вимог ПУЕ температура нагрівання при коротких замиканнях не повинна перевищувати, °С:

Рис. 5.12. Залежність приведеного часу дії струмів короткого замикания:

а — при живленні від генераторів з автоматичним регулюванням напруги;

б — при живленні від генераторів без автоматичного регулювання напруги;

для мідних шин і голих проводів 250

для мідних струмоведучих жил:

кабелів з паперовою просоченою ізоляцією напругою до 10 кВ, кабелів і проводів з теплостійкої гумової ізоляцією, проводів з поліхлорвініловою ізоляцією 200

кабелів і проводів зі звичайною гумовою ізоляцією 150

кабелів з паперовою просоченою ізоляцією напругою 20 і 35 кВ 125

для алюмінієвих шин і голих проводів, а також струмоведучих жив кабелів і проводів у всіх випадках 150

для сталевих шин і голих проводів:

при безпосереднім з'єднанні з апаратами 250

при відсутності безпосереднього з'єднання 350

Початкові значення температур варто приймати відповідно до норм для температури, що допускається довгостроково, провідників при їх повному номінальному навантаженні. На практиці користуватися формулою доводиться тільки при розрахунку шинних конструкцій підстанцій і розподільних пристроїв, а також кабельних ліній. Термічну стійкість апаратури характеризують так званим струмом термічної стійкості, під яким мають на увазі струм сталої величини, що витримується апаратом протягом певного часу без неприпустимих підвищень температури. Для виявлення прийнятності того чи іншого апарату з погляду термічної стійкості необхідно порівняти кількість тепла, що виділяється струмом Іт.у термічної стійкості за гарантований час tт.у, з дійсною кількістю тепла, що виділяється в апараті при короткому замиканні. Тому що кількість тепла пропорційна квадрату величини струму та першого ступеня часу, зазначене порівняння необхідно робити, користуючись формулою

$$I_{m.y}^2 t_{m.y} \geq I_{к\infty}^2 t_{n.n}.$$

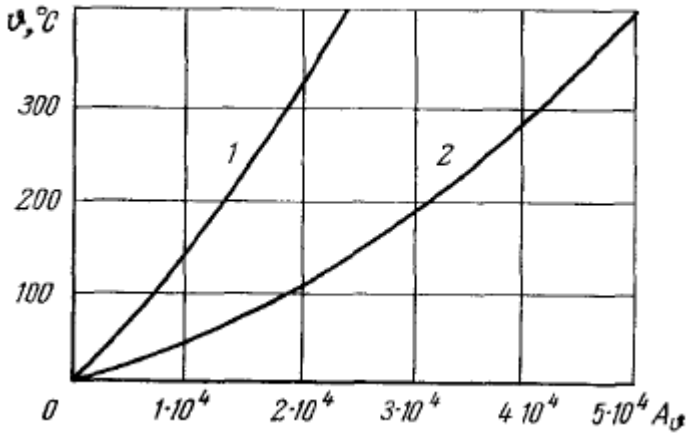


Рисунок 13 - Криві для визначення температури нагрівання проводів при короткому замиканні: 1 — алюміній; 2 — мідь

Перевірці за термічною стійкістю не підлягають:

а) апарати й струмоведучі частини, захищені плавкими запобіжниками;

б) дроти повітряних ліній;

в) мережі напругою до 1000 В;

г) провідники до індивідуальних електроприймачів, у тому числі до цехових трансформаторів потужністю до 1000 кВ.А та вищою напругою до 20 кВ за умов резервування, виконаного таким чином, що відключення струмоприймачів не викликає розладу технологічного процесу, ушкодження провідника при короткому замиканні не може викликати вибуху й заміна провідника можлива без значних утруднень.

15. Електродинамічна дія струмів КЗ. (сам.роб.)

16. Обмеження струмів короткого замикання

При невеликих установках (підстанціях і т.п.), що живляться від потужних енергетичних систем, апаратура, обрана за умовами короткого замикання, виходить дуже громіздкою й дорогою. Тому струми короткого замикання в установках малої потужності напругою вище 1000 В знижують за допомогою включення додаткових індуктивних опорів (реакторів), додаткових активних опорів (резисторів), шляхом відмови від паралельної роботи трансформаторів на стороні нижчої напруги або шляхом застосування трансформаторів з розщепленими обмотками.

Необхідно відзначити, що всі заходи щодо збільшення опору короткозамкненого кола з метою зниження потужності (струму) короткого замикання спричиняють збільшення відхилень напруги, зростання коливань напруги при пуску й самозапуску електродвигунів і при роботі електродвигунів з різкозмінним ударним навантаженням, утрудняють підтримку необхідних рівнів напруги при різних режимах роботи. З цієї

причини не викликане необхідністю надмірне зниження струмів короткого замикання допускати не слід.

У необхідних випадках оптимальні величини струму короткого замикання повинні визначатися техніко-економічним розрахунком за мінімумом витрат на електроустаткування, необхідне для обмеження струму короткого замикання, а також на пристрої й заходи щодо доведення якості електроенергії до нормального рівня. Основні труднощи при виборі оптимального струму короткого замикання виникають, як правило, у мережах з різкозмінним ударним навантаженням, особливо при наявності вентильних перетворювачів.

При виборі реактору необхідно пам'ятати, що він створює додаткову втрату напруги й при нормальній роботі системи. Величина цієї втрати напруги може бути знайдена на підставі векторної діаграми (рис. 15), на якій $\vec{U}_1$ і $-\vec{U}_2$ напруги до й після реактора, I -струм, що протікає через реактор, φ — кут зрушення фаз між струмом і напругою за реактором. Через малість кута ψ між векторами $\vec{U}_1$ й $\vec{U}_2$ для реальних параметрів ланцюга короткого замикання, величиною відрізка bc можна зневажити й уважати втрату напруги в реакторі рівною відрізку ab:

$$\Delta U_p = \sqrt{3} I x_p \sin\varphi,$$

де хр — індуктивний опір реактора.

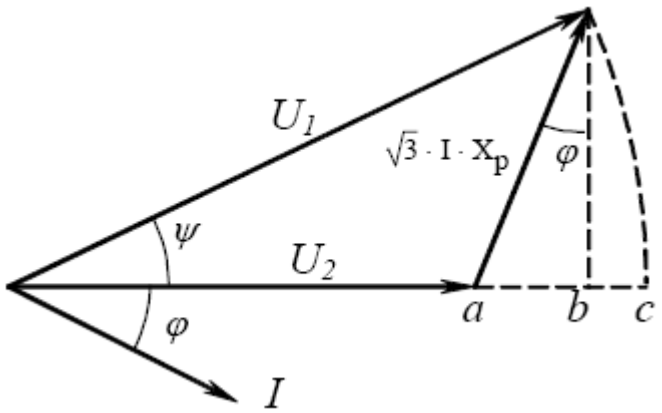


Рисунок 15 - Векторна діаграма реактора

Ділячи обидві частини рівняння на номінальну напругу реактора, одержуємо

$$\frac{\Delta U_p}{U_{ном.р}} = \frac{\sqrt{3} I x_p}{U_{ном.р}} \sin\varphi$$

і, переходячи до відносних одиниць, вираженим у відсотках, маємо втрату напруги в реакторі

$$\Delta U_p\% = x_p\% \sin\varphi.$$

При короткому замиканні в мережі за реактором напруга на шинах підстанції не падає до нуля, а дорівнює втраті напруги в реакторі.

Цю напругу називають залишковою і виражають формулою

$$U_{зал} = \sqrt{3} I_к x_р.$$

Переходячи до відносних одиниць, останню формулу можна перетворити до виду

$$\Delta U_{зал}\% = x_{ном.р}\% \frac{I_к}{I_{ном.р}} \frac{U_{ном.р}}{U_{ном}}.$$

Для забезпечення роботи споживачів, що живляться від шин підстанції, реактор варто вибирати так, щоб при короткому замиканні на лінії напруга на шинах підстанції знижувалася не більш ніж до 70% номінальної величини.

В електроустановках напругою до 1000 В реактори не застосовуються. Застосування резисторів замість реакторів у силових колах менш ефективно, тому що в короткозамкнених колах переважають індуктивні опори, і геометричне підсумовування індуктивного опору короткозамкненого кола з активним опором резистора значно менше впливає на сумарний опір, чим алгебраїчне підсумовування індуктивних опорів кола й реактора.

При зниженні струму короткого замикання шляхом відмови від паралельної роботи трансформаторів на стороні нижчої напруги необхідно враховувати вплив цього рішення на розподіл навантаження між трансформаторами й на надійність електропостачання. При застосуванні трансформаторів з розщепленими обмотками, що живлять окремі секції шин підстанції, необхідно враховувати утруднення при регулюванні напруги на секціях шин у порівнянні з варіантом живлення секцій шин від окремих трансформаторів.

Контрольні питання

1. Які особливості розрахунку струмів КЗ у мережах напругою до 1000 В і чим вони обумовлені?
2. Як визначити початкове значення струму КЗ, створюваного джерелом необмеженої потужності.
3. Як визначити початкове значення струму КЗ, створюваного генератором або двигуном.
4. Яке призначення розрахунків коротких замикань?
5. Які приймають припущення при розрахунку струмів КЗ?
6. Як складається розрахункова схема СЕП при розрахунку струмів КЗ?
7. Як складається схема заміщення СЕП для розрахунку струмів КЗ?
8. Які ви знаєте перетворення схем заміщення до найпростішого виду?
9. Як приймаються базисні умови?
10. Назвіть способи обмеження струмів КЗ.