

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 6

**РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ
КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ**

1. Основні положення

При складанні розрахункової схеми електропостачання підприємства для аварійного режиму роботи з коротким замиканням її еквівалентно подають відносно місця КЗ з двох частин за джерелами енергії:

- генератори електричної системи;
- електроспоживачі із запасом енергії до моменту часу виникнення аварійного режиму.

Через різний характер електромагнітних процесів ці частини СЕП слід розглядати нарізно.

У складанні схем заміщення зазначених частин СЕП керуються таким:

- для моменту часу $t = 0$ активні елементи СЕП (генератори, двигуни) еквівалентуються джерелами е.р.с. $E_t = const$ з внутрішнім опором x''_d або x'_d , а пасивні (трансформатори, ЛЕП, реактори) – лише електричними опорами ;
- для часу $t > 0$ у еквівалентів активних елементів $E_t = var$ та $x_t = var$, а пасивних елементів $x_t = const$ (не враховуємо зміну значення частоти в аварійному режимі) і $r_t = var$ (через нагрівання провідників перебігом струму КЗ, що характерно в електричних мережах напругою до 1 кВ з переважним значенням активної складової опору).

Перетворення схем заміщення та обчислення параметрів аварійного режиму відбувається з урахуванням електромагнітної (розмагнічувальної) реакції джерел на виникнення КЗ. Міра впливу останньої оцінюється безпосередньо за електричною віддаленістю. Названі особливості впливають на вибір та використання способів визначення характеристик перехідного процесу і параметрів аварійного режиму.

Розрахунки з високою точністю значень характеристик та параметрів аварійного режиму в СЕП, що виникає внаслідок КЗ, для $t > 0$ вимагають великого обсягу обчислень. Вони значно ускладнюються, якщо врахувати

автоматичне регулювання збудження генераторів, відмінності параметрів синхронних машин у поздовжній та поперечній осях, невизначеність поведінки двигунів приєднаних навантажень. При проектуванні та експлуатації СЕП в основному використовують спрощені способи визначення показників перехідного процесу. У ряді випадків за допомогою найпростіших оцінок треба визначити лише рівень значень шуканих величин, достатніх для з'ясування умов роботи електроустановки або обґрунтування практичного вирішення завдань його експлуатації.

Спрощення розрахунку (для простоти обчислень, очевидної порівнянності та контролю результатів розрахунку з фізичною картиною явища) базується на певних припущеннях. Останні беруться для конкретних умов відповідно до поставленого завдання та кінцевої мети розрахунку.

Основна відмінність між практичними способами розрахунку параметрів аварійного режиму, що виникає внаслідок КЗ, полягає у визначенні періодичної складової струму КЗ залежно від вимог та призначення розрахунків, узятих припущень. Наприклад, якщо значення струму у місці КЗ обчислюється для вибору електроустановки, придатні одні припущення, а при розв'язанні завдань захисту елементів та настроювання засобів автоматизації СЕП – інші, що потребують розрахунків з порівняно меншими похибками.

Для трифазних мереж електроустановок напругою понад 1 кВ промислової частоти опрацьована загальна методика розрахунку струмів КЗ, викладена у стандарті [35], у початковий та довільний моменти часу перебігу аварійного режиму. Методика передбачає обчислення струмів КЗ для вирішення завдань: вибір та перевірка електроустановки за умов короткого замикання; вибір запобіжних уставок та оцінка можливої дії засобів захисту і автоматики СЕП; визначення впливу струмів нульової послідовності ліній електропередачі на супутні лінії зв'язку; вибір заземлювальних пристроїв електроустановок.

Обчислювальні показники перехідного процесу внаслідок КЗ, допустима похибка обчислень та вибір способу розрахунку залежать від кінцевої мети розрахунків. Для вибору та перевірки електроустановки струми КЗ можна розраховувати спрощеними способами, якщо їх похибка не перевищує 5...10%. При цьому обчислюють:

- значення періодичної складової струму та потужності КЗ у початковий і довільний моменти часу перебігу аварійного режиму, у тому числі для розрахункового часу розмикання пошкодженого кола;
- значення аперіодичної складової струму КЗ у початковий та довільний моменти часу, а також для розрахункового часу розмикання пошкодженого кола;
- ударний струм КЗ;

- струморозподіл у схемі СЕП;
- залишкові напруги у вузлах схеми СЕП

Для вибору значень параметрів настроювання захисту елементів й автоматики СЕП як вихідні дані обчислюють найбільше та найменше розрахункові значення періодичної і аперіодичної складових струму КЗ у початковий та довільний моменти часу в місці КЗ чи в окремих вітках розрахункової схеми.

Рекомендована стандартом методика [35] не поширюється на розрахунки струмів КЗ:

- за складних видів несиметрії у СЕП (наприклад, одночасні КЗ та обрив), при повторних КЗ та КЗ у СЕП з нелінійними елементами;
- з урахуванням динаміки електричних машин в електромеханічних перехідних процесах;
- при розгляді перехідного процесу внаслідок КЗ усередині електричних машин, трансформаторів та автотрансформаторів;
- для непромислових значень частот, що виникають при КЗ у лініях електропередач напругою 220 кВ та вище;
- в електроустановках напругою 750 кВ та вище.

Для розрахунку показників зазначених аварійних перехідних режимів використовують спеціальні методи. Обчислення значень струмів КЗ для довільних моментів часу в місці КЗ та в окремих вітках розрахункової схеми слід розглядати у межах електромеханічних перехідних процесів, до чого залучають ЕОМ та відповідні методи дослідження динамічної стійкості режиму енергетичної системи.

Загалом під час визначення струму КЗ необхідно враховувати всі активні елементи електричної системи. Допускається еквівалентувати віддалену від місця КЗ частину електричної системи – усі джерела електроенергії, для яких КЗ віддалено. Її відповідні елементи можуть бути відносно місця КЗ або іншого обраного вузла мережі еквівалентовані одним джерелом незмінної напруги і одним опором (таке джерело зветься “електричною системою”). Якщо для конкретного вузла електричної мережі значення струму трифазного КЗ $I_k^{(3)}$ чи потужності трифазного КЗ $S_k^{(3)}$ відомо, то еквівалентний індуктивний опір джерела “електрична система” визначається за виразом

$$x_{GS} = U_{cp\ n} / (\sqrt{3}I_k^{(3)}) = U_{cp\ n}^2 / S_k^{(3)}, \quad (1)$$

де $U_{cp\ n}$ – середня номінальна напруга у вузлі.

Значення е.р.с. джерела “електрична система” слід брати рівним середній номінальній напрузі у вузлі електричної мережі.

Залежно від складності розрахункової схеми СЕП струми КЗ визначають аналітично з використанням еквівалентних схем заміщення чи із застосуванням

аналогових розрахункових моделей змінного та сталого струмів або математичних моделей на ЕОМ.

Спосіб розрахунку струму короткого замикання обирають з таких міркувань. В одноконтурних розрахункових схемах СЕП струм КЗ слід обчислювати за аналітичним чи графоаналітичним способом рекомендованими прийомами перетворення схем. У багатоконтурних же розрахункових схемах СЕП струм КЗ варто обчислювати методами вузлових напруг або контурних струмів із застосуванням ЕОМ.

Під час використання методу вузлових напруг розв'язуємо матричне рівняння

$$\underline{I}_{\text{вуз}} = \underline{Y}_{\text{вуз}} \underline{U}_{\text{вуз}}, \quad (2)$$

де $\underline{I}_{\text{вуз}}$ – стовпцева матриця вузлових струмів; $\underline{Y}_{\text{вуз}}$ – квадратна матриця власних та взаємних вузлових провідностей; $\underline{U}_{\text{вуз}}$ – стовпцева матриця вузлових напруг.

За методом контурних струмів спершу треба розв'язати матричне рівняння

$$\underline{E}_k = \underline{Z}_k \underline{I}_k, \quad (3)$$

де \underline{E}_k – стовпцева матриця е.р.с.; \underline{Z}_k – квадратна матриця власних та взаємних опорів незалежних контурів; \underline{I}_k – стовпцева матриця контурних струмів.

Для трифазних електричних мереж СЕП напругою до 1 кВ промислової частоти, приєднаних до енергосистеми або з автономними джерелами електроенергії, струми КЗ розраховують відповідно до стандарту [36]. За ним установлюється загальна методика розрахунку струмів симетричних та несиметричних КЗ (найбільших та найменших значень) у початковий і довільний моменти часу перебігу аварійного режиму з урахуванням параметрів синхронних та асинхронних машин, трансформаторів, реакторів, кабельних і повітряних ліній, шинопроводів, конденсаторних батарей та вузлів з комплексним навантаженням.

Параметри режиму з КЗ розраховують за початковими даними для вирішення завдань вибору та перевірки електроустаткування за умов дії КЗ, вибору уставок захисту, пристроїв автоматики та комутаційних апаратів і розрахунку заземлювальних пристроїв. Склад показників перехідного режиму та рівень допустимої похибки розрахунків струмів КЗ обирають залежно від кінцевої мети. Для вибору та перевірки електроустаткування за умов дії КЗ розрахункові показники допускається визначати спрощеними способами розрахунку струмів КЗ, якщо їхня похибка не перевищує 10 %. Розрахунку підлягають: початкові значення періодичної та аперіодичної складових струму КЗ; ударний струм; діючі значення періодичної складової струму КЗ у довільні моменти часу, у тому числі – для розрахункового часу розмикання пошкодженого кола мережі.

При проектуванні захисту елементів СЕП розраховують найбільші та найменші значення періодичної складової струму в місці КЗ у початковий та

довільний моменти часу, а також для розрахункового часу розмикання пошкодженого кола. Для вибору заземлювальних пристроїв електроустановок обчислюють струм однофазного КЗ.

Зазначена у стандарті [36] методика не поширюється на розрахунки струмів КЗ:

- при складних видах несиметрії у СЕП (наприклад, одночасні КЗ та обрив), у разі повторних КЗ та при КЗ в електроустановках з нелінійними елементами;
- з урахуванням динаміки електричних машин в електромеханічних перехідних процесах;
- усередині електричних машин і трансформаторів.

Методики розрахунку показників перехідного режиму при трифазних КЗ орієнтовані на використання для певних ієрархічних рівнів СЕП (зовнішнє та внутрішнє електропостачання, електричні мережі до 1 кВ). Методи розрахунку застосовуються у таких характерних випадках: спільне живлення від електроенергетичних систем (ЕЕС) та ТЕЦ (ТЕС); підживлення місця КЗ від електродвигунів; підживлення місця КЗ від вузла з комплексним навантаженням; участь джерела реактивної потужності (ДРП) у живленні місця КЗ.

Досвід розрахунків перехідних режимів свідчить, що помилки в обчисленні початкових значень струмів КЗ практичними методами – у межах $\pm 5\%$. Під час обчислення значень струмів у вітках для довільних моментів часу перебігу аварійного режиму за допомогою практичних способів розрахунку помилки сягають 10...15% (залежно від віддаленості та тривалості КЗ).

У наближених розрахунках аналітично прийнято визначати лише діюче значення періодичної складової струму КЗ за перший період та ударний струм КЗ. При живленні від джерела “електрична система” необмеженої потужності діюче значення періодичної складової трифазного струму КЗ буде

$$I_{I0}^{(3)} = U_{ср н} / (\sqrt{3} z_{рез}). \quad (4)$$

З використанням діючого значення періодичної складової за перший період обчислюють ударний струм КЗ:

миттєвого значення

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \kappa_y I_{I0}^{(3)}; \quad (5)$$

діючого значення

$$I_y = I_{I0}^{(3)} \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}. \quad (6)$$

Для $t = 0,01c$ та при середньому значенні сталої часу затухання аперіодичної складової $T_a = 0,05 c$

$$\kappa_y = 1 + \exp(-0,01 / 0,05) = 1,8,$$

а значення ударного струму

$$i_y^{(3)} = 2,55 I_{I0}^{(3)};$$
$$I_y^{(3)} = 1,52 I_{I0}^{(3)}.$$

Під час обчислення струмів КЗ у віддалених точках електричної мережі, в яких щодо впливу на значення струму помітно позначається активна складова опору короткозамкненого кола (при КЗ за трансформаторами малої потужності, у протяжних кабельних лініях, мережах напругою до 1 кВ), рекомендується визначати значення сталої часу затухання аперіодичної складової відповідно до виразу

$$T_a = x_{рез} / (\omega r_{рез}) \quad (7)$$

та обчислювати нове значення κ_y .

При наближених розрахунках КЗ у протяжних кабельних мережах чи після трансформаторів потужністю менше 1000 кВ·А орієнтовно можна вважати $\kappa_y = 1,3$.

2. Використання діаграм періодичної складової струму в мережі з одним джерелом

При трифазному КЗ у мережі періодичну складову струму синхронного генератора для довільних моментів часу перебігу аварійного режиму можна розраховувати графоаналітичним способом за спеціальними діаграмами. Останні мають конкретну сферу застосування (залежно від структури СЕП, потужності джерел живлення, мети розрахунку, вимог та умов реалізації результатів оцінки аварійного режиму) і складають основу одного з напрямків спрощених методів розрахунку значень показників перехідних процесів у СЕП, ініційованих трифазними короткими замиканнями. Діаграми – графічне відображення функціональних залежностей між е.р.с. джерела електричної енергії, періодичною складовою струму КЗ, часом перехідного процесу та електричною віддаленістю місця КЗ від джерела електричної енергії. Вони охоплюють широкий діапазон потужностей джерел живлення, неявно враховують зміни е.р.с. E_t у часі й різняться лише за наявністю і типом систем збудження генераторів.

Діаграми допомагають швидкому та простому виконанню наближених обчислень значень періодичної складової струму в місці КЗ мережі. Універсальність досягнена усередненням значень параметрів реальних генераторів та наближеним обліком впливу навантаження у СЕП на струм у місці КЗ, що відповідно пов'язане із зниженням точності розрахунків. Їх недолік – вузька сфера вживання, зокрема для обчислення значення струму тільки в місці КЗ, тобто не передбачається визначення струмів аварійного режиму у вітках електричної мережі СЕП.

Для спрощених розрахунків використовуються універсальні типові криві. Вони виділяються розширеною сферою застосування щодо потужності джерел електроенергії, обліком типів систем збудження генераторів; в їх побудові використані значення параметрів нових типів синхронних генераторів.

Типові криві – це залежності (рис. 1,а)

$$\gamma_{t\Gamma} = f_1(t, I_{*n\Gamma}), \quad (8)$$

а також додаткові залежності (рис. 1,б)

$$\gamma_{t\Gamma} = f_2(\gamma_{t\Sigma}, C_\Gamma), \quad (9)$$

де $\gamma_{t\Gamma} = I_{\Pi t\Gamma} / I_{\Pi 0\Gamma}$ – відносні значення періодичної складової струму КЗ для моментів часу аварійного режиму $t \in [0; 3 \text{ с}]$; $I_{*n\Gamma} = I_{\Pi 0\Gamma} / I_{n\Gamma}$ – показник, яким характеризують електричну віддаленість місця КЗ від генератора; $\gamma_{t\Sigma} = I_{\Pi t\Sigma} / I_{\Pi 0\Sigma}$ – відносні значення періодичної складової струму в місці КЗ; C_Γ – частка (коефіцієнт струморозподілу) струму від генератора у сумарному струмі в місці КЗ для часу $t = 0$.

До залежностей (5.8) увійшли параметри режиму синхронного генератора (еквівалентного джерела): $I_{\Pi t\Gamma}$, $I_{\Pi 0\Gamma}$ – діючі значення періодичної складової струму КЗ в генеруючій вітці у довільні моменти часу t і початкове значення цієї складової відповідно; $I_{n\Gamma}$ – значення номінального струму синхронного генератора, зведене до ступеня напруги у місці КЗ.

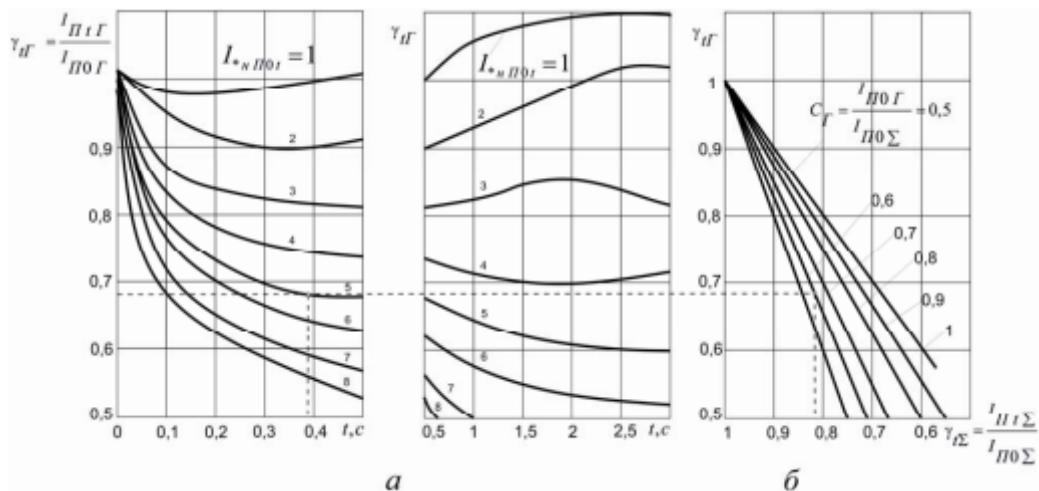


Рис. 1. Зміни у часі та від електричної віддаленості точки КЗ періодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними генераторами і компенсаторами з тиристорною або високочастотною системою збудження

Графічними залежностями (9) користуються в розрахункових схемах з двобічним живленням місця КЗ: від синхронного генератора (еквівалентного джерела) та електричної системи як джерела необмеженої потужності. Вони зв'язують параметри режиму вітки генератора $I_{\Pi t\Gamma}$, $I_{\Pi 0\Gamma}$ з параметрами режиму

у місці КЗ ($I_{\Pi\Omega\Sigma}$, $I_{\Pi\Sigma}$ – значення періодичної складової струму в довільні моменти часу аварійного режиму t від усіх джерел у місці КЗ).

Використані для побудови типових кривих дані окреслюють сферу застосування для розрахунків. Криві уніфіковані для гідрогенераторів потужністю 12...800 МВт, турбогенераторів – до 500 МВт включно та синхронних компенсаторів 37,5...100 МВ·А при радіальній схемі; типові криві різняться за типом систем збудження генераторів; побудовані для синхронних генераторів (компенсаторів), в яких кратність граничної напруги збудження стосовно номінальної напруги збудження не перевищує двох.

Типові криві: з рис. 1,*а,б* слід використовувати для розрахунку діючого значення періодичної складової струму КЗ від синхронних генераторів з тиристорною або високочастотною системою збудження, а також від синхронних компенсаторів; при цьому для гідрогенераторів з перевищеною кратністю напруги збудження (більше двох) допускається їх використовувати тільки за невеликої електричної віддаленості місця КЗ, коли $I_{*н} \Pi\Omega \Gamma > 3$; з рис. 2,*а,б* – від синхронних генераторів з тиристорною системою самозбудження з послідовними трансформаторами і без них відповідно; з рис. 3 – від синхронних генераторів з діодною безщітковою системою збудження.

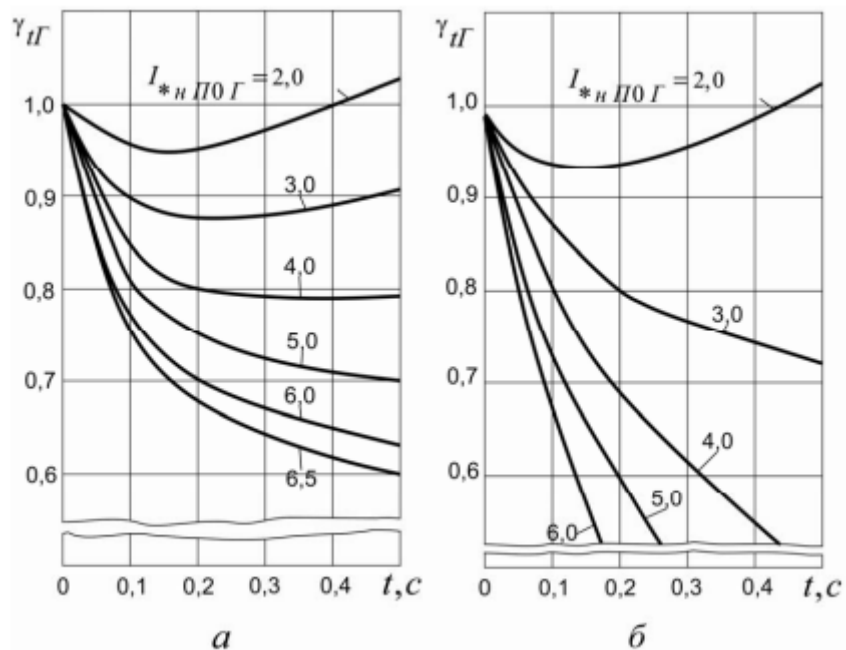


Рис. 2. Зміна у часі та від електричної віддаленості точки КЗ періодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними генераторами і компенсаторами з тиристорною системою самозбудження: *а* – з послідовними трансформаторами; *б* – без послідовних трансформаторів

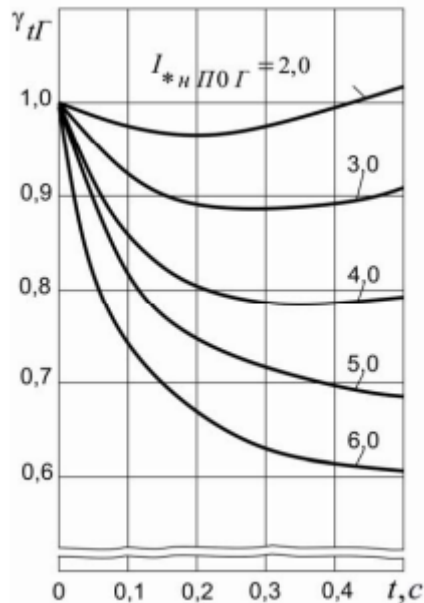


Рис. 3. Зміна у часі та від електричної віддаленості точки КЗ періодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними генераторами з діодною безщітковою системою збудження

Коротке замикання вважається електрично віддаленим, якщо відношення діючого значення періодичної складової струму синхронного генератора у початковий момент КЗ до його номінального струму $\gamma_{t Г} < 2$; періодична складова струму КЗ від цього генератора – стала за амплітудою.

Для вітки незалежного радіального живлення місця КЗ від синхронного генератора (компенсатора) чи декількох однотипних синхронних генераторів (компенсаторів), що перебувають в однакових умовах стосовно місця КЗ, діюче значення їх періодичної складової струму розраховують у такому порядку:

1) складають схему заміщення та розраховують результуючий опір $Z_{рез}$ від джерела до місця КЗ;

2) обчислюють початкове значення періодичної складової струму КЗ від синхронного генератора (групи генераторів) й знаходять відносне значення струму;

3) за кривою $\gamma_{t Г} = f_1(t, I_{*н}^{п0Г})$, що відповідає значенню електричної віддаленості $I_{*н}^{п0 Г}$, для заданого моменту часу t_i отримують відношення струмів

$$(I_{п t Г} / I_{п 0 Г})_{t_i} = \gamma_{t_i Г};$$

4) знаходять натуральне діюче значення періодичної складової струму КЗ від синхронного генератора (групи генераторів) у момент часу t_i :

$$I_{п t_i Г} = \gamma_{t_i Г} \cdot I_{п 0 Г}. \quad (10)$$

Визначення періодичної складової струму КЗ з використанням типових кривих ураховує параметри та характеристики генераторів джерела живлення (потужність, тип системи збудження, розрахунковий час КЗ), віддаленість місця

КЗ, структуру системи зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства.

3. Використання діаграм періодичної складової струму в мережі з кількома джерелами

При обчисленні струму в місці КЗ у СЕП з кількома джерелами живлення слід оцінювати можливість зменшення у схемі заміщення їх кількості, використовуючи відомості про тип, потужність, систему збудження та електричну віддаленість місця КЗ. Розрізняють обчислення періодичної складової струму КЗ за загальною зміною від об'єднаних джерел та індивідуальною зміною, якщо необхідно знайти значення складових струму КЗ від кожного генератора.

Зміст розрахунку за загальною зміною полягає в заміні груп однотипних та однаково електрично віддалених синхронних генераторів еквівалентним з наступним визначенням періодичної складової струму КЗ для еквівалентного генератора, для чого:

1) складають розрахункову схему, а потім – схеми заміщення СЕП для обчислення початкового значення періодичної складової струму в кожній точці КЗ;

2) знаходять значення еквівалентних опорів між кожним джерелом і точкою КЗ та е.р.с. генеруючих віток;

3) оцінюють значення електричної віддаленості точки КЗ від кожного джерела для незалежних генеруючих віток (не зв'язаних з точкою КЗ через загальний опір);

4) обирають спосіб обчислення струму КЗ: якщо за початковими даними ця вітка живлення від енергетичної системи з $U_{GS} = const$ чи еквівалентне джерело належить до джерел необмеженої потужності або може бути віднесена до них при оцінці електричної віддаленості ($I_{*н} \text{ по } \Gamma < 2$ або $x_{*н \text{ роз}} > 3$), то створювану еквівалентним генератором періодичну складову струму обраховують за формулою (4); для електрично невіддалених місць КЗ (залежно від характеристик еквівалентного генератора) для обчислення беруть типові криві.

Розрахунок за індивідуальною зміною полягає у визначенні складових струму КЗ від різнотипних синхронних генераторів, у тому числі і за системою збудження, чи генераторів електростанцій з різною електричною віддаленістю від місця КЗ. Періодичні складові струму КЗ окремих генераторів або електростанцій змінюються у часі неоднаково. Тому якщо струми КЗ, створювані різнотипними генераторами чи електростанціями з різною електричною віддаленістю від місця КЗ обчислювати не індивідуально, виявиться значна похибка.

Періодичні складові струму КЗ, створювані джерелами, знаходять окремо для кожної вітки схеми заміщення і в точці КЗ підсумовують їх значення.

Якщо характеристики джерел дають змогу використовувати типові криві для розрахунку значень їх періодичних складових струму КЗ, то для незалежних генеруючих віток послідовність розрахунку така ж, як і за загальною зміною струму КЗ. Для віток генератора та електричної системи, сполучених з точкою КЗ через загальний опір Z_k , періодичну складову струму КЗ розраховують так (рис. 4):

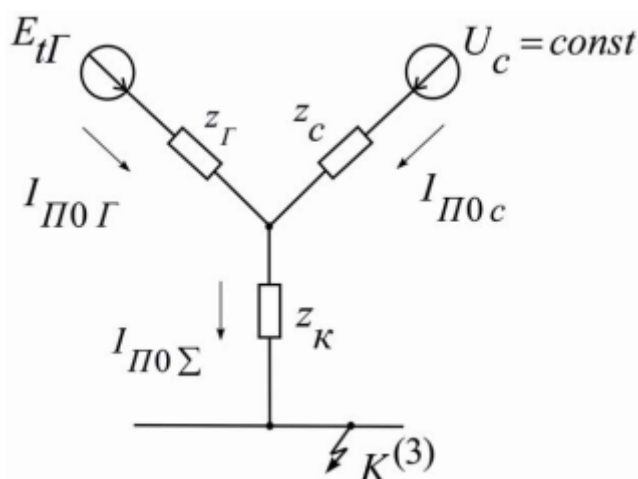


Рис. 4. Еквівалентна схема заміщення СЕП під час живлення точки КЗ від генератора та електричної системи через загальний опір

1) для часу $t = 0$ знаходять результуючий опір $Z_{*б\text{рез}}$ та сумарну е.р.с. $E_{*б0}$ з метою обчислення початкового значення періодичної складової струму в точці КЗ за формулою

$$I_{\Pi 0 \Sigma} = E_{*б0 \Sigma} \cdot I_{б} / Z_{*б\text{рез}};$$

2) обчислюють початкове значення періодичної складової струму у вітці генератора за виразом

$$\tilde{I}_{\Pi 0 Г} = [E_{*б0 \Sigma} \cdot I_{б} - I_{\Pi 0 \Sigma} \cdot Z_{*бк}] / Z_{*бГ}; \quad (11)$$

3) визначають відношення $I_{\Pi 0 Г} / I_{н Г}$ та $I_{\Pi 0 Г} / I_{\Pi 0 \Sigma}$

(коли $C_{Г} = I_{\Pi 0 Г} / I_{\Pi 0 \Sigma} < 0,5$, що відповідає значній електричній віддаленості генератора від місця КЗ чи малій потужності генератора, то вітки генератора та електричної системи доцільно об'єднувати);

4) за типовими кривими $\gamma_{tГ} = f_2(\gamma_{tС}, C_{Г})$ при відомому значенні $I_{*н \Pi 0 Г}$ для розрахункового моменту часу t_i знаходять відношення $\gamma_{tГ}$, а далі відповідно до значення $C_{Г}$ встановлюють $\gamma_{t\Sigma}$;

5) за знайденим відношенням $\gamma_{t\Sigma}$ та відповідним значенням $I_{\Pi 0 \Sigma}$ обчислюють періодичну складову струму в точці КЗ згідно з виразом

$$I_{\Pi t \Sigma} = \gamma_{t \Sigma} \cdot I_{\Pi 0 \Sigma}. \quad (12)$$

Сумарне значення періодичної складової струму в точці КЗ, утворене кількома джерелами, розраховують за формулою

$$I_{\Pi t(1, \dots, N)} = I_{\Pi t1} + I_{\Pi t2} + \dots + I_{\Pi tN}. \quad (13)$$

Виділяти багато генеруючих віток у схемі заміщення СЕП недоцільно. Схему будь-якої складності достатньо звести до двох-трьох еквівалентних генеруючих віток, вмикаючи до кожної з них джерела живлення (генератори або електростанції), що приблизно на однаковій електричній відстані від місця КЗ.

4. Розрахунок періодичної складової струму для довільного моменту часу з використанням методу спрямлених характеристик

Метод спрямлених характеристик створено для обчислення в довільні моменти часу при спрощеному обліку зміни у часі е.р.с. E_t за модулем та фазою; до нього удаються при обчисленні уточнених значень у $t > 0$. За цим методом ураховується затухання вільної складової струму та вплив регуляторів напруги генератора. В його основі – вживання графічних залежностей при визначенні розрахункових значень E_t та x_t турбогенераторів з пристроями АРЗ.

Далі йдеться про зазначені графічні залежності, отримані для розповсюджених турбогенераторів потужністю 200...300 МВт під час їх роботи у попередньому режимі з номінальним навантаженням. Спрявлені характеристики побудовані для умов роботи типового генератора у радіальній схемі, поданій схемою заміщення на рис. 5,а. Типове навантаження еквівалентоване сталим опором, віднесеним до вищої напруги трансформатора, і для $\cos\varphi_n = 0,8$ можна наближено обчислити значення $r_{n\text{ нв}}$ та $x_{*n\text{ нв}}$, коли виникненню КЗ передувало номінальне навантаження: $r_{*n\text{ нв}} = 1/0,8 = 1,25$; $x_{*n\text{ нв}} = 1/0,6 = 1,67$.

Значення типових параметрів узяті для турбогенераторів потужністю 200...300 МВт з пристроями АРЗ:

$$\begin{aligned} x_{*nd}'' &= 0,2; \quad x_{*nd}' = 0,28; \\ x_{*nd} &= 1,9; \quad T_{f0} = 6 \text{ c}; \quad T_d'' = 0,115 \text{ c}; \quad \cos\varphi = 0,8. \end{aligned}$$

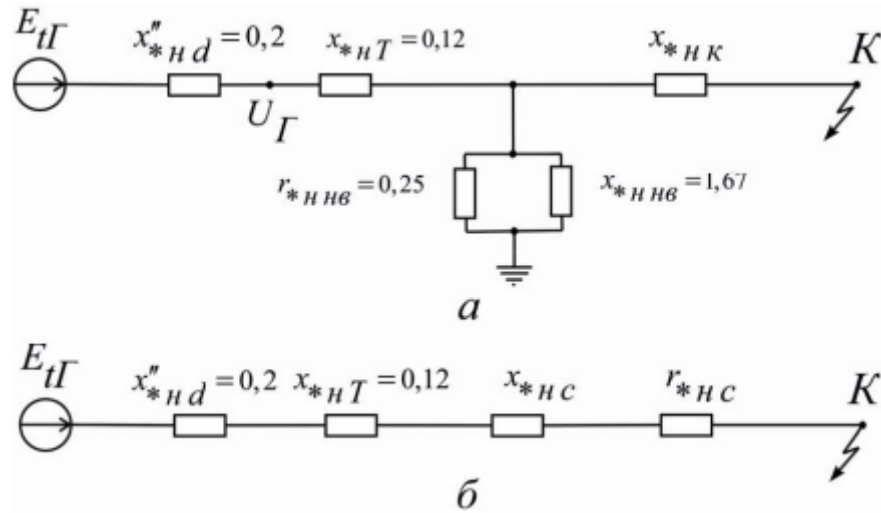


Рис. 5. Схеми заміщення при побудові спрямлених характеристик: *а* – первинна; *б* – перетворена

Побудова спрямлених характеристик $E_{*n} = E_{\Gamma} = f_1(t)$ та $x_{*n} = x_{\Gamma} = f_2(t)$ виконана для перетвореної схеми заміщення з рис. 5,а на рис. 5,б з новими розрахунковими значеннями елементів:

$$x_{*нс} = \frac{r_{*нв}^2 x_{*нп}}{r_{*нв}^2 + x_{*нп}^2}; \quad (14)$$

$$r_{*нс} = \frac{r_{*нв} x_{*нп}^2}{r_{*нв}^2 + x_{*нп}^2}, \quad (15)$$

де

$$x_{*нп} = \frac{x_{*нв} x_{*нк}}{x_{*нв} + x_{*нк}}. \quad (16)$$

При побудові спрямлених характеристик використані розрахункові криві зміни струмів КЗ турбогенераторів потужністю 200...300 МВт із значеннями сталої часу збуджувача $T_e = 0,2...0,3$ с та $T_e = 0...0,15$ с. Розрахункові значення е.р.с. E_{*nt} та реактивного опору x_{*nt} генератора для окремих моментів часу отримані (рис. 6) спрямленням характеристик $E_t = f_1(I_{\Gamma})$ і $x_t = f_2(I_{\Gamma})$. Результати такого спрямлення для турбогенераторів з різними значеннями сталої часу збуджувача $T_e = 0,2...0,3$ с та $T_e = 0...0,15$ с практично (з допустимою похибкою) збігаються. Тому криві $E_t(t)$ та $x_t(t)$ беруться для турбогенераторів із значеннями сталої часу збуджувача T_e від 0 до 0,3 с (електромашинне та іонне збудження).

Для випадків, коли реальні значення параметрів генераторів різняться від значень типового генератора, користуються кривими $\sigma_{Et} = f_3(t)$ та $\sigma_{xt} = f_4(t)$ (рис. 6). З урахуванням коефіцієнтів σ_{Et} і σ_{xt} уточнюють розрахункові вирази:

$$E_t = E_{qep} - (E_{qep} - E_{\Gamma}'') \sigma_{Et}; \quad (17)$$

$$x_t = x_d - (x_d - x_d'') \sigma_{xt}, \quad (18)$$

де $E_{q_{zp}}$ – синхронна е.р.с. $t(t = \infty)$, що відповідає граничному струмові збудження (кратність форсування збудження ке враховується),

$$E_{q_{zp}} = \kappa_e \sqrt{(U_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma})^2 + (U_{\Gamma} \sin \varphi_{\Gamma} + I_{\Gamma} x_d)^2}; \quad (19)$$

E''_{Γ} – надперехідна е.р.с.

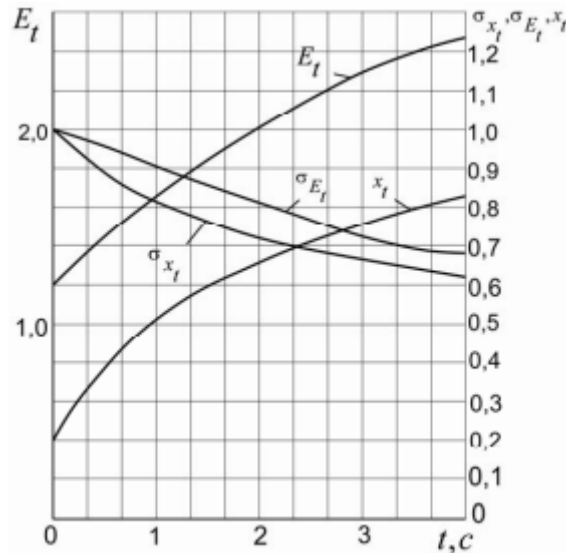


Рис. 6. Спрямлені характеристики $E, x, \sigma_{E_t}, \sigma_{x_t}$ (відн. од.) типових турбогенераторів потужністю 200...300 МВт з пристроями АРЗ ($T_e = 0...3$ с)

Якщо стала часу T_{f0} для генератора різниться від узятото при побудові кривих розрахункового значення 6 с, з деяким наближенням можна користуватися тими ж кривими з рис. 6 для зведеного значення

$$\hat{t} = t \frac{6}{T_{f0}}. \quad (20)$$

Визначення періодичної складової струму КЗ містить у собі використання кривих граничного часу (спрощений облік кута розбігу δ між е.р.с. кількох генераторів за фазою). Взяті припущення: сталість значень е.р.с. за перехідним реактивним опором x'_d генератора; заміщення навантажень сталими опорами; стала потужність первинного двигуна. Типові криві граничного часу (інтегральні криві) дають змогу знайти залежність від розрахункового (зведеного) часу τ значень кута δ між е.р.с. генераторної станції та напругою шин необмеженої потужності в електричній системі (рис. 7,а) або значень кута δ між е.р.с. двох генераторних станцій (рис. 7,б). Для електричних систем з багатьма генераторними станціями необхідний їх поділ на дві групи, у кожній з яких своя залежність у часі е.р.с. за кутом δ .

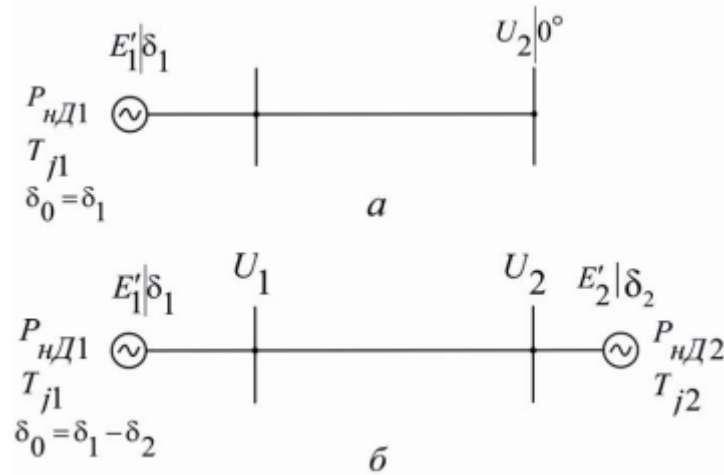


Рис. 7. Первинні схеми до пояснення методу граничних кривих: *а* – система необмеженої потужності з однією електростанцією; *б* – те ж з двома електростанціями

Типові криві залежності кута δ_{zp} між е.р.с. генераторних станцій чи між е.р.с. генераторної станції та напругою шин електричної системи необмеженої потужності від зведеного часу τ за різних значень параметра T і початкового кута δ_0 – на рис. 8. Ці криві побудовані за диференціальним рівнянням руху роторів генераторів.

Для випадку роботи генераторної станції на електричну систему необмеженої потужності (рис. 7,*а*)

$$\frac{T_{J1}}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{нд1} - \frac{(E'_1)^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E'_1 U_{GS}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}), \quad (21)$$

де T_{J1} – стала інерції генераторної станції, зведена до базисних умов; δ_{12} – кут між е.р.с. генераторної станції та напругою шин електричної системи необмеженої потужності; $P_{нд1}$ – потужність первинного двигуна генераторної станції (зведена до базисних умов); E'_1 – перехідна е.р.с. генераторної станції; U_{GS} – напруга шин електричної системи необмеженої потужності; Z_{11} – модуль власного опору з боку генераторної станції, відн. од.; α_{11} – кут доповняльний (до 90°) власного опору Z_{11} ; Z_{12} – модуль взаємного опору генераторної станції та шин електричної системи необмеженої потужності, відн. од.; α_{12} – кут доповняльний (до 90°) взаємного опору Z_{12} .

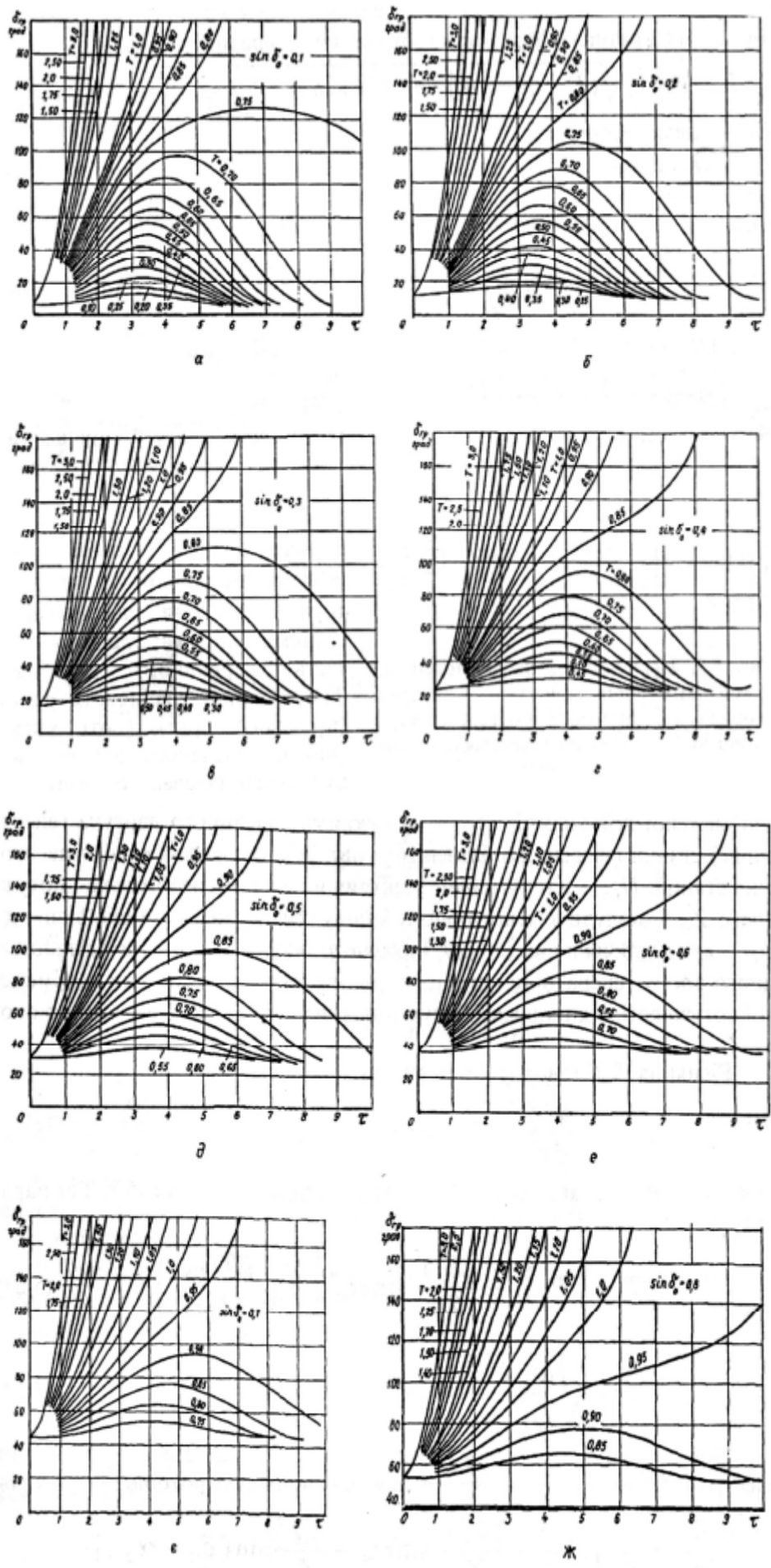


Рис. 8. Криві граничного часу для різних значень $\sin \delta$

Рівняння (21) зводиться до виразу

$$\frac{d^2 \delta}{d\tau^2} = T - \sin \delta, \quad (22)$$

за яким і розраховано графічні залежності, наведені на рис. 8. Тут параметри:

$$T = \left[P_{\text{ПД1}} - \frac{(E'_1)^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} \right] / \left(\frac{E'_1 U_{GS}}{Z_{12}} \right); \quad (23)$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\omega_0 E'_1 U_{GS}}{T_{J1} Z_{12}}}; \quad \delta = \delta_{12} - \alpha_{12}. \quad (24)$$

При паралельній роботі двох генераторних станцій, зв'язаних електричною мережею, диференціальне рівняння руху роторів генераторів

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = & \frac{1}{T_{J1}} \left[P_{\text{ПД1}} - \frac{(E'_1)^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E'_1 E'_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \right] - \\ & - \frac{1}{T_{J2}} \left[P_{\text{ПД2}} - \frac{(E'_2)^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E'_1 E'_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \right], \end{aligned} \quad (25)$$

де E'_2 – перехідна е.р.с. другої генераторної станції; Z_{22} – модуль власного опору схеми з боку другої генераторної станції, відн.од.; α_{22} – кут доповняльний (до 90°) власного опору Z_{22} ; $P_{\text{ПД2}}$ – потужність первинного двигуна та T_{J2} – стала інерції другої генераторної станції, зведені до базисних умов.

Вираз (24) можна подати у вигляді (22), де параметри

$$\delta = \delta_{12} + \psi; \quad (26)$$

$$\psi = \arctg \left(\frac{T_{J1} - T_{J2} \operatorname{tg} \alpha_{12}}{T_{J1} + T_{J2}} \right); \quad (27)$$

$$T = \frac{T_{J1} \left[P_{\text{ПД1}} - \frac{(E'_1)^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} \right] - T_{J2} \left[P_{\text{ПД2}} - \frac{(E'_2)^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} \right]}{\frac{E'_1 E'_2}{Z_{12}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2T_{J1} T_{J2} \cos(2\alpha_{12})}}; \quad (28)$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\omega_0 E'_1 E'_2}{T_{J1} T_{J2} Z_{12}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2T_{J1} T_{J2} \cos(2\alpha_{12})}}. \quad (29)$$

Етапи розрахунку періодичної складової струму КЗ для заданого моменту часу за допомогою спрямлених характеристик у поєднанні з кривими граничного часу:

1. Розраховують власні та взаємний опори Z_{11} , Z_{22} і Z_{12} . Власні опори Z_{11} та Z_{22} визначають струмом від е.р.с. даного джерела при відсутності е.р.с. від інших джерел:

$$\underline{Z}_{11} = \left. \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{E}_2=0}; \quad \underline{Z}_{22} = \left. \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{E}_1=0}.$$

Взаємний опір визначають струмом у колі даного джерела, зумовленим е.р.с. іншого джерела,

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2} \Big|_{\dot{E}_2=0} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_1} \Big|_{\dot{E}_1=0}$$

2. Обчислюють параметр T , значення зведеного часу τ та початковий кут δ_0 .

3. За значеннями τ , T і δ_0 з допомогою кривих граничного часу визначають δ_{ep} між е.р.с. генераторної станції та напругою шин електричної системи необмеженої потужності або між е.р.с. двох генераторних станцій.

4. За залежностями $E_{*n} = f_1(t)$ та $x_{*n} = f_2(t)$ чи $\sigma_{Ee} = f_3(t)$ та $\sigma_{xe} = f_4(t)$ знаходять для заданого моменту часу t значення модуля е.р.с. E_t і опорів x_t генераторів.

5. Схему заміщення складають з параметрів генераторів за п.4; електричну систему необмеженої потужності вводять своїми (зведеними до базисних умов) напругою та опором (дорівнює нулю).

6. За складеною схемою заміщення розраховують заданий вид КЗ для моменту часу t .

При використанні методу симетричних складових за допомогою залежностей $E_{*n} = f_1(t)$ та $x_{*n} = f_2(t)$ розраховують струм прямої послідовності для будь-якого виду несиметричного КЗ. Для цього генератори вводять до схеми прямої послідовності із значеннями е.р.с. E_t і опорів x_t , що визначаються згідно з кривими рис. 6, а електрична система необмеженої потужності – з відповідними напругою та опором (дорівнює нулю). Якщо внаслідок розрахунку струму КЗ для заданого моменту часу виявиться, що відносне значення напруги на затискачах одного або кількох генераторів більше одиниці, здійснюють повторний розрахунок. При цьому відповідні генератори вводять до схеми з е.р.с., що дорівнюють одиниці, та опорами, які дорівнюють нулю (тобто працюють у режимі нормальної напруги).

Під час розрахунку струму КЗ методом спрямлених характеристик навантаження повинні бути введені до схем відповідних послідовностей у точках їх дійсного підключення.

5. Розрахунок струму короткого замикання за принципом накладання

Принцип накладання зводиться до умовного подання дійсного режиму з КЗ у вигляді двох складових режимів: попереднього навантажувального та наступного, власне, аварійного.

Розрахунок ґрунтується на введенні в точці КЗ двох джерел із взаємно протилежними напругами $\pm U_k^{(n)}$, що дорівнюють напрузі попереднього режиму в цій точці (рис. 9,а).

Електрорушійна сила генератора у поєднанні з напругою $\pm U(n)$ у точці КЗ забезпечує умови попереднього навантажувального режиму (рис. 9,б). Прикладена у точці КЗ напруга $-U_k^{(n)} = U_k$ (рис. 5.9,в) реалізує умови аварійного режиму.

Струм у будь-якій вітці схеми при КЗ слід знаходити як

$$\dot{I}_k = \dot{I}_0 + \dot{I}_{ав}, \quad (30)$$

де I_0 – струм у вітці схеми при нормальному навантажувальному режимі; $I_{ав}$ – струм у вітці схеми аварійного режиму. Для місця КЗ струм дорівнює $I_k = I_{ав}$, оскільки у вітці замикання до КЗ струму не було ($I_0 = 0$).

Стосовно розрахунку несиметричного КЗ напруги $\pm U_k^{(n)}$ повинні прикладатися до точки КЗ фіктивного місця КЗ, віддаленого на опір $Z_{\Delta}^{(n)}$ від дійсного місця КЗ (рис. 9,в). При цьому використовують комплексні схеми заміщення розширенням схеми заміщення прямої послідовності. За правилом струму прямої послідовності несиметричні струми КЗ установлюють як струми умовного трифазного КЗ при віддаленні місця КЗ на опір $Z_{\Delta}^{(n)}$. Струми та напруги дійсного режиму КЗ визначають з таких міркувань.

У схемі заміщення прямої послідовності струми у місці КЗ дорівнюють аварійним струмам. Напруга у місці КЗ та струми інших ділянок знаходять підсумовуванням значень параметрів обох режимів. У схемах заміщення зворотної та нульової послідовностей струми і напруги у місці КЗ та на інших ділянках дорівнюють параметрам аварійного режиму.

У комплексній схемі заміщення аварійного режиму опір $Z_{\Delta}^{(n)}$ може бути розгорнений у повні схеми заміщення через опори зворотної та нульової послідовностей. Застосування принципу накладання ефективно для розрахунку струмів КЗ спрощеними методами у тому разі, коли струми попереднього навантажувального режиму відомі або їх можна наближено оцінити у тих елементах схеми, для яких необхідно знайти розподіл струмів прямої послідовності та повних фазних струмів. Використовують його також при потребі встановити лише величини, що характеризують власне аварійний режим. Зокрема, вживання цього принципу має перевагу у порівнянні з розрахунком за визначеними е.р.с. для розрахунку струмів та напруг зворотної і нульової послідовностей. При цьому можуть бути розраховані тільки складові аварійного режиму, виходячи з напруги попереднього режиму у місці КЗ. Оскільки напруги на шинах окремих підстанцій у навантажувальному режимі практично не різняться від номінальної, у першому наближенні, коли дійсні значення напруги у попередньому навантажувальному режимі невідомі, її можна взяти як розрахункову при спрощених розрахунках.

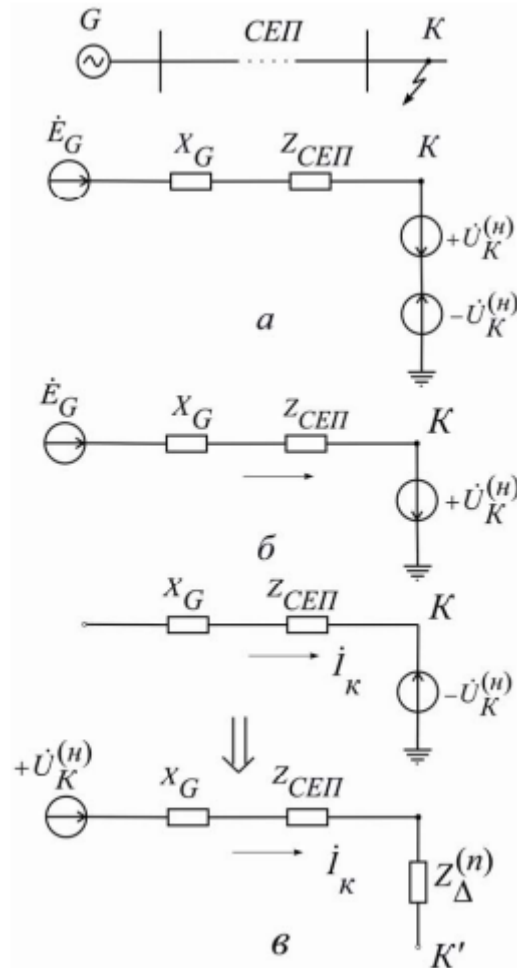


Рис. 9. . Етапи еквівалентування схем за принципом накладання: *а* – розрахункова та заміщення дійсного режиму з КЗ; *б* – заміщення попереднього навантажувального режиму; *в* – заміщення власне аварійного режиму