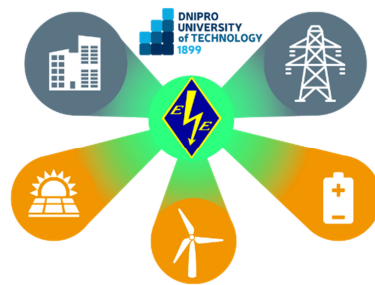


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електроенергетики

Г.Г. Півняк, Ю.А. Папаїка

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни «Перехідні процеси в системах електропостачання»
Частина I: «Електромагнітні перехідні процеси»
для студентів спеціальності
141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Дніпро
НТУ «ДП»
2021

Півняк Г.Г.

Конспект лекцій з дисципліни «Перехідні процеси в системах електропостачання». Частина I: «Електромагнітні перехідні процеси» для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Г.Г. Півняк, Ю.А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 164 с.

Автори:

Г.Г. Півняк, акад. НАН України;
Ю.А. Папаїка, д-р техн. наук, проф.

Затверджено методичною комісією зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021) за поданням кафедри електроенергетики (протокол № 14 від 02.07.2021).

Конспект лекцій описує теоретичні основи аналізу перехідних процесів в системах електропостачання при аварійних та аномальних режимах електричних мереж. Розкрито методи розрахунку струмів короткого замикання при симетричних та несиметричних пошкодженнях електрообладнання.

Розглянуто режимні параметри перехідних процесів електричних мереж з урахуванням електромагнітної сумісності.

Матеріал оформлено у максимально зручному для студентів вигляді, наведено глосарій та подано ілюстрації до кожної теми. Для швидкого оволодіння спеціальною термінологією окремо подано основні визначення.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри електроенергетики
Ю.А. Папаїка, д-р техн. наук, проф.

ЗМІСТ

ТЕМА 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ.....	4
ТЕМА 2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ.....	11
ТЕМА 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ.....	21
ТЕМА 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ СИНХРОННИХ МАШИН	35
ТЕМА 5. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ.....	40
ТЕМА 6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ	51
ТЕМА 7. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ	58
ТЕМА 8. РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ (ГЕНЕРАТОРИ).....	63
ТЕМА 9. РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ (ВУЗОЛ НАВАНТАЖЕННЯ).....	75
ТЕМА 10. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРУГОЮ ДО 1 кВ	87
ТЕМА 11. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ У ТРИФАЗНІЙ МЕРЕЖІ	99
ТЕМА 12. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ ПОПЕРЕЧНОЇ НЕСИМЕТРІЇ	109
ТЕМА 13. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ	120
ТЕМА 14. РІВНІ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ	132
ТЕМА 15. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ.....	149
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	163

ТЕМА 1

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Загальні положення

Необхідність удосконалення систем електропостачання (СЕП) визначена розвитком промисловості, транспорту, будівництва, агропромислового комплексу. Підприємства цих галузей у складній інфраструктурі промислових центрів і міст – основні споживачі електричної енергії й обумовлюють високу щільність електричного навантаження з його перетворенням на інші види енергії за різних значень напруги і струму. СЕП характеризуються багаторівневими ступенями розподілу електроенергії; потужними вузлами навантаження з різними видами перетворення параметрів електромагнітної енергії, складом електроприймачів; джерелами живлення від електроенергетичної системи (ЕЕС), місцевих теплових електростанцій (ТЕС), синхронних компенсаторів, джерел реактивної потужності (ДРП), а в аварійних режимах – від двигунів, що перейшли в генераторний режим; значною розгалуженістю розподільних електричних мереж; зворотним впливом електротехнологічних процесів та великих електроприймачів на функціонування СЕП в аварійних режимах.

Велику роль відіграє підвищення економічності СЕП з високим рівнем надійності роботи в різних умовах і режимах експлуатації, включаючи аварійні та післяаварійні режими. У цьому зв'язку до СЕП, їхніх режимів роботи й якості електроенергії, що можна оцінити на основі досліджень перехідних процесів, ставляться підвищені вимоги.

Як свідчить досвід розвинутих країн, значна увага приділяється розробці методів досліджень та розрахунку перехідних процесів, спрямованих на створення СЕП нового технічного рівня, збереження стійкості їх режимів з необхідним рівнем економічності, якості електроенергії, надійності і безпеки експлуатації. Вирішенню завдань, що виникають при аналізі та розрахунку перехідних процесів, значною мірою сприяє широке використання методів моделювання СЕП і засобів обчислювальної техніки, що дає можливість вибирати найбільш прийнятні схемні рішення й електричні характеристики елементів СЕП, а також досягати вищих значень показників їх економічності та надійності не тільки в нормальних, а й в перехідних режимах.

Перехідні процеси в електричних системах широко висвітлені в науковій та відповідній навчальній літературі. Узагальненого підручника з перехідних процесів у СЕП для студентів вузів тривалий час не було. Щоб заповнити цю прогалину, авторський колектив представників Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» та Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» підготував підручник для ЗВО «Перехідні процеси в системах електропостачання». З часом було декілька видань цього підручника українською, російською та англійською мовами (2000, 2003, 2009, 2016). Ідея написання підручника для вузів «Перехідні процеси в системах електропостачання» (К.: Вища школа, 1989) належала професорам В.М.Винославському (НТУУ «КПІ») та Г.Г.Півняку (НТУ «ДП»).

Автори підручника отримали Державну премію України в галузі науки і техніки 2005 року.

Структурно книга складається з вступу і двох частин. У першій частині розглянуто перехідні електромагнітні процеси, обумовлені виникненням коротких замикань, поперечної і поздовжньої несиметрії та викликані технологічними процесами в СЕП. Друга частина присвячена перехідним електромеханічним процесам, спільному впливу перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів на стійкість режиму СЕП.

Для закріплення теоретичного матеріалу, окрім прикладів практичних розрахунків, наприкінці кожного розділу подані контрольні запитання і теми рефератів, що спрямують самостійну роботу з дисципліни.

Історичні відомості

На початку практичного використання електричної енергії умови роботи генераторів, двигунів й інших елементів електроустановок аналізувалися з урахуванням лише *вимог нормальних режимів*. Перші електроустановки, як малопотужні, були з достатнім запасом стійкості проти механічних, теплових та інших впливів і в робочих режимах, і в аварійних ситуаціях.

Зі збільшенням потужності електроустановок їхні пошкодження та значні відхилення від нормальних режимів роботи супроводжувалися серйозними наслідками. Знадобилася розробка спеціальних заходів і засобів для забезпечення роботи електроустановок в аварійних ситуаціях. Необхідно було розробити прийнятні методи розрахунку перехідних процесів і запроваджувати засоби захисту електроустановок від пошкоджень з урахуванням перехідних процесів, а також вирішити проблему забезпечення стійкості режимів роботи.

На перших етапах розвитку електроенергетики дослідження перехідних процесів перебували в початковій стадії. Методи розрахунку перехідних процесів, що застосовувалися, не мали належного теоретичного обґрунтування і були досить наближеними. Особливо відчутно це виявилось в Радянському Союзі у період втілення в життя плану ГОЕЛРО, коли з'явилася необхідність обґрунтувати створення великих електричних систем і забезпечення їхньої стійкої роботи, уточнення методів розрахунку перехідних процесів у складно розгалужених електричних мережах, розробки методів обмеження струмів короткого замикання (КЗ), засобів захисту електроустановок від впливу КЗ та вирішення інших завдань.

За короткий час було здійснено низку важливих досліджень з перехідних процесів. Так, протягом 1926-1930 рр. Л.І.Сиротинський, В.П.Хащинський, М.М.Щедрін та А.А.Смуров дослідили перехідні процеси в синхронних електричних машинах. Уперше в світовій літературі були видані книги з питань стійкості електричних систем (1933-1934), де знайшли відображення результати вітчизняних досліджень та узагальнені розробки закордонних учених. О.О.Горєв і Р.Х.Парк незалежно один від одного склали диференціальні рівняння електромагнітного перехідного процесу синхронної електричної машини (1930-1935).

Передвоєнні роки стали періодом інтенсивного розвитку наукових основ, практичних методів дослідження перехідних процесів та керування режимами електричних систем. Спираючись на дослідження М.М.Щедрина, С.О.Ульянова, А.Б.Черніна, Б.І.Розенберга та інших учених, були уточнені і розроблені більш досконалі методи розрахунку струмів КЗ в електричних системах. І.М.Маркович та С.А.Совалов обґрунтували запропоновані раніше і ввели нові практичні критерії оцінки статичної стійкості електричних систем (1937-1938). Водночас П.С.Жданов та К.А.Смирнов виявили природу "лавини напруги", запропонували методи аналізу стійкості електричного навантаження. У наступні роки С.А.Лебедев, І.А.Сиромятников та інші вчені теоретично й експериментально дослідили застосування автоматичного регулювання збудження (АРЗ) синхронних машин, що надалі широко впроваджувалися в електричних системах (1938-1940).

У повоєнні роки (1950-1955) автоматичні засоби частотного розвантаження, регулювання напруги, повторного вмикання резерву постійно вдосконалювалися І.А.Сиромятниковим, Л.Г.Цукерником, С.С.Рокотяном, Д.І.Азар'євим, С.В.Усовим та іншими вченими і стали обов'язковими для застосування у всіх ЕЕС.

З розвитком енергетичних систем та їхніх об'єднань розв'язувані завдання ускладнилися. У 60-ті роки широко застосовуються розрахункові моделі постійного струму і статичні моделі змінного струму. Подальшому розвитку досліджень перехідних процесів в електроустановках сприяло використання аналогових машин безупинної дії й електродинамічних (фізичних) моделей.

За останні роки як основні засоби для розрахунку й аналізу перехідних процесів в електроустановках використовують цифрові обчислювальні машини. На часі також створення і застосування комплексів, що містять фізичну модель, аналогові елементи для імітації діючих регулювальних пристроїв та керуючу електронну обчислювальну машину (ЕОМ). Це дає можливість автоматизувати керування і використовувати сучасні методи опрацювання та контролю результатів дослідження.

Режими систем електропостачання

Зміни умов роботи СЕП супроводжуються перехідними процесами, що викликають зміну режимів СЕП. Сукупність процесів, що характеризують умови роботи СЕП та її стан у будь-який момент часу, називається режимом системи. Кількісні показники режиму (параметри режиму) – це значення потужності, напруги, струму й інших показників, пов'язаних між собою залежностями через відповідні параметри системи.

До параметрів системи належать опори та провідності елементів, коефіцієнти трансформації, постійні часу, коефіцієнти підсилення й інші параметри, обумовлені фізичними властивостями і схемою з'єднання елементів, а також розрахунковими даними.

У СЕП можуть мати місце *усталені та перехідні (нестационарні) режими*. Перші характеризуються сталими (повільними) незначними змінами параметрів режиму системи, а другі – їхніми швидкими змінами в часі.

За зміною параметрів режиму СЕП розрізняють чотири види режимів:

– *нормальні усталені*, коли значення параметрів режиму змінюються в межах, що відповідають нормальній роботі споживачів, обумовленої їх основними техніко-економічними характеристиками;

– *нормальні перехідні*, що відповідають звичайним експлуатаційним змінам у СЕП (вмикання, вимикання, перемикавання, зміна навантаження та ін.). Ці режими характеризуються швидкою і різкою зміною параметрів стану роботи деяких елементів СЕП при незначних змінах параметрів режиму в її вузлах;

– *аварійні усталені та перехідні*, що виникають у СЕП під дією таких змін у схемах електричних з'єднань, за яких значення параметрів режиму помітно різняться від номінальних;

– *післяаварійні усталені*, що настають після вимикання пошкоджених елементів СЕП, обумовленого необхідністю ліквідації аварії. Параметри режиму СЕП можуть бути у них близькими до параметрів нормального режиму або значно різнитися. Відповідно матиме місце сприятливий або несприятливий вихід з аварійного стану в СЕП.

Основне завдання збереження необхідного режиму СЕП – підтримка таких значень параметрів режиму, за яких забезпечується стійкість певного режиму. Стійкість режиму – це здатність СЕП при збуреннях зберігати припустимі значення параметрів у вузлах. Розрізняють статичну та динамічну стійкість.

Причини виникнення перехідних процесів

Перехідні процеси в СЕП – результат зміни режимів, спричинених експлуатаційними умовами або наслідками пошкодження ізоляції чи струмоведучих частин електроустановок.

Причинами виникнення перехідних процесів можуть бути впливи на елементи системи:

– вмикання, вимикання чи перемикавання джерел електричної енергії, трансформаторів, ЛЕП, електроприймачів та інших елементів;

– поява несиметрії фазних струмів і напруг через вимикання окремих фаз, несиметричних змін навантаження, обривів фаз тощо;

– короткі замикання в елементах СЕП;

– прискорення збудження синхронних машин та гасіння їх магнітного поля;

– раптові накиди та скиди навантаження;

– асинхронний пуск двигунів та синхронних компенсаторів;

– реверсування асинхронних двигунів;

– асинхронний хід синхронних машин після їх випадання із синхронізму;

– кліматичні впливи на елементи СЕП;

– повторні вмикання та вимикання короткозамкнених ланцюгів мереж.

Перехідні процеси, викликані комутаційними перемикаваннями елементів системи, виконанням випробувань і регулюванням режимів, належать до умов нормальної експлуатації, а КЗ, обриви фаз, повторні вмикання та вимикання короткозамкнених ланцюгів, випадання генераторів із синхронізму та інші порушення нормальних режимів – з розряду аварійних ситуацій.

Граничні значення параметрів режиму електроустановок при перехідних процесах у нормальних режимах експлуатації враховуються під час виготовлення електричного устаткування, проектування та спорудження СЕП, при обґрунтуванні експлуатаційних режимів.

Призначення розрахунків перехідних процесів

Перехідні процеси в системах електропостачання вивчають після одержання необхідних знань із загальноосвітніх та спеціальних дисциплін, в яких розглядаються окремі елементи СЕП. Перехідні процеси в СЕП аналізують з урахуванням зв'язків між елементами системи і поточних змін параметрів режиму.

Мета досліджень і розрахунків перехідних процесів в тому, щоб, з'ясувавши особливості роботи та якісно нові властивості при кількісних змінах у СЕП, навчитися передбачати перебіг перехідних процесів і керувати ними. Тому потрібно вміти їх розраховувати, прогнозувати за зміною параметрів системи кількісні зміни режимів і через регульовальні пристрої впливати на перехідний процес.

Дослідження та розрахунки перехідних процесів – необхідні умови вирішення багатьох завдань, що виникають при проектуванні та експлуатації СЕП. Зокрема, для вибору принципів дії і налаштування автоматичних пристроїв протиаварійного керування, аналізу електромеханічних перехідних процесів з метою визначення умов стійкості електричного навантаження та розробки заходів для забезпечення безперервної роботи промислових підприємств у різних режимах СЕП.

На основі досліджень і розрахунків перехідних процесів *вирішуються найважливіші питання проектування, спорудження та експлуатації СЕП:*

- обґрунтування економічно доцільних систем передачі, розподілу і споживання електричної енергії;
- забезпечення належного режиму після перехідних процесів у системі;
- виконання вимог щодо якісних показників перехідних процесів;
- забезпечення стійкості переходу від одного режиму до іншого;
- оцінка стійкості режиму після закінчення перехідних процесів;
- визначення тривалості та впливу перехідного процесу на зміну параметрів режиму системи;
- випробування апаратів та СЕП у перехідних режимах.

За результатами *досліджень і розрахунків перехідних процесів* варто проектувати такі СЕП, перехідні процеси в яких закінчувалися б припустимим усталеним режимом. При цьому перехідні процеси слід розглядати з двох позицій:

- надійності СЕП;
- поведінки системи та її окремих елементів при зміні умов роботи.

З урахуванням перехідних процесів повинні бути забезпечені зміни параметрів режиму СЕП, за якими якісні показники електропостачання споживачів істотно б не знижувалися. Тому таке важливе значення має

зменшення тривалості перехідного процесу, вилучення можливості виникнення нових перехідних процесів, завершення перебігу перехідного процесу достатньо надійним режимом.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. До СЕП, їхніх режимів роботи і якості електроенергії, що можна оцінити на основі досліджень перехідних процесів, ставляться підвищені вимоги.

2. Значна увага приділяється розробці методів досліджень та розрахунку перехідних процесів, спрямованих на створення СЕП нового технічного рівня, збереження стійкості їх режимів з необхідним рівнем економічності, якості електроенергії, надійності і безпеки експлуатації.

3. Зміни умов роботи СЕП супроводжуються перехідними процесами, що викликають зміну режимів СЕП.

4. Сукупність процесів, що характеризують умови роботи СЕП та її стан у будь-який момент часу, називається *режимом системи*.

5. Кількісні показники режиму (параметри режиму) – це значення потужності, напруги, струму й інших показників, пов'язаних між собою залежностями через відповідні параметри системи.

6. До параметрів системи належать опори та провідності елементів, коефіцієнти трансформації, постійні часу, коефіцієнти підсилення й інші параметри, обумовлені фізичними властивостями і схемою з'єднання елементів, а також розрахунковими даними.

7. У СЕП можуть мати місце усталені та перехідні (нестационарні) режими.

Перші характеризуються сталими (повільними) незначними змінами параметрів режиму системи, а другі – їхніми швидкими змінами в часі.

За зміною параметрів режиму СЕП розрізняють чотири види режимів:

- нормальні усталені;
- нормальні перехідні;
- аварійні усталені та перехідні;
- післяаварійні усталені.

8. Основне завдання збереження необхідного режиму СЕП – підтримка таких значень параметрів режиму, за яких забезпечується *стійкість певного режиму*.

9. Стійкість режиму – це здатність СЕП при збуреннях зберігати припустимі значення параметрів у вузлах. Розрізняють статичну та динамічну стійкість.

10. Перехідні процеси в СЕП – результат зміни режимів, спричинених експлуатаційними умовами або наслідками пошкодження ізоляції чи струмоведучих частин електроустановок.

11. Перехідні процеси, викликані комутаційними перемиканнями елементів системи, виконанням випробувань і регулюванням режимів, належать до умов нормальної експлуатації.

12. Короткі замикання, обриви фаз, повторні вмикання та вимикання короткозамкнених ланцюгів, випадання генераторів із синхронізму та інші порушення нормальних режимів – з розряду аварійних ситуацій.

13. Граничні значення параметрів режиму електроустановок при перехідних процесах у нормальних режимах експлуатації враховуються під час виготовлення електричного устаткування, проектування та спорудження СЕП, при обґрунтуванні експлуатаційних режимів.

14. Перехідні процеси в СЕП аналізують з урахуванням зв'язків між елементами системи і поточних змін параметрів режиму.

15. Мета досліджень і розрахунків перехідних процесів – передбачати перебіг перехідних процесів і керувати ними. Тому потрібно вміти їх розраховувати, прогнозувати за зміною параметрів системи кількісні зміни режимів і через регульовальні пристрої впливати на перехідний процес.

16. На основі досліджень і розрахунків перехідних процесів вирішуються найважливіші питання проектування, спорудження та експлуатації СЕП.

17. З урахуванням перехідних процесів повинні бути забезпечені зміни параметрів режиму СЕП, за якими якісні показники електропостачання споживачів істотно б не знижувалися.

Тестові питання по темі 1

1. Значення дисципліни та її роль у формуванні теоретичних і практичних знань перехідних процесів.
2. Основні етапи досліджень та вдосконалення розрахунків перехідних процесів.
3. Види режимів і процесів у СЕП.
4. Різниця між поняттями "параметри режиму" та "параметри системи".
5. Причини виникнення перехідних процесів у СЕП.
6. Призначення розрахунку перехідних процесів.

ТЕМА 2

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

Причини та наслідки коротких замикань

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

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

В електроустановках залежно від класифікаційних ознак електричних мереж (напруга, вид струму, кількість фаз чи полюсів, стан нейтралі або середньої точки тощо) необхідно розрізняти такі види коротких замикань (табл. 1.1.):

- **трифазне КЗ** – це замикання між трьома фазами в трифазній електричній мережі змінного струму;

- **трифазне КЗ на землю** або нульовий провід у трифазній електричній мережі змінного струму з глухозаземленими або ефективно заземленими нейтралями силових елементів, коли з'єднуються між собою та із **землею три фази**;

- **трифазне КЗ із землею** виникає в трифазній мережі змінного струму з ізольованими або резонансно заземленими нейтралями силових елементів, коли місце замикання трьох фаз контактує з землею;

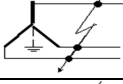
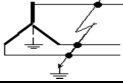
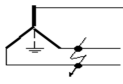
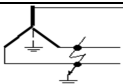
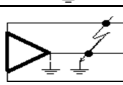
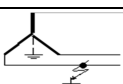
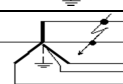
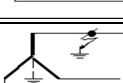
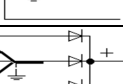
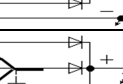
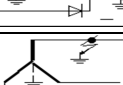
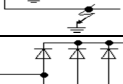
- **двофазне КЗ** – замикання між двома фазами в трифазній електричній мережі змінного струму;

- **двофазне КЗ на землю** виникає між двома фазами, коли фази з'єднуються з землею, в трифазній електричній мережі з глухозаземленими та ефективно заземленими нейтралями силових елементів, у двофазній тяговій мережі змінного струму, де одна фаза ввімкнена до контактної мережі, а інша заземлена до рейкового кола;

- **двофазне КЗ із землею** – це замикання двох фаз у трифазній електричній мережі змінного струму з ізольованими або резонансно заземленими нейтралями силових елементів, що має зв'язок з землею;

- **однофазне КЗ на землю** – це замикання однієї фази з землею чи заземленим нульовим проводом у три- або однофазній електричній мережі змінного струму з глухозаземленими (ефективно заземленими) нейтралями силових елементів;

Види коротких замикань в електроустановках

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

• **однофазне КЗ** – це замикання фази з нульовим проводом в однофазній електричній мережі змінного струму з ізольованою або резонансно заземленою нейтраллю (виводом);

• **однофазне замикання із землею** – це з'єднання фази з землею в три- або однофазній (з нульовим проводом) електричній мережі змінного струму з ізольованими чи резонансно заземленими нейтраллями (виводами) силових елементів;

• **двополюсне КЗ на землю** виникає в мережі постійного (випрямленого) струму з заземленою середньою точкою джерела струму, коли місце замикання полюсів з'єднується з землею.

За характером проходження КЗ поділяють на симетричні та несиметричні, стійкі та нестійкі, видозмінні. При *симетричному КЗ* усі три фази

електроустановки перебувають в однакових умовах. Якщо при КЗ хоч одна з фаз різнитиметься від умов інших фаз, то його називають *несиметричним КЗ*. До *стійких КЗ* в електроустановках зараховують такі, які зберігаються і після безструмової паузи комутаційного апарата. До *нестійких КЗ* належать такі з них, поява яких самоліквідується за безструмової паузи комутаційного електричного апарата, який розмикає коло перебігу струму КЗ. *Видозмінним КЗ* називають замикання в електроустановці з переходом одного виду КЗ в інший.

За основними видами відносний розподіл КЗ в електричних мережах такий: $K^{(3)} \approx 5$, $K^{(2)} \approx 10$, $K^{(1)} \approx 65$, $K^{(1,1)}$ та $K^{(1+1)} \approx 20\%$. Статистичні дослідження свідчать про те, що питома частота різних видів КЗ залежить від напруги мережі (табл. 1.2). За причинами виникнення розрізняють навмисні та випадкові КЗ.

Навмисні КЗ – це, власне, робочий момент у функціонуванні технологічного обладнання (електрозварювальні агрегати, електродугові печі і т. ін.) та електротехнічних пристроїв (повітряні розрядники, коротковмикачі, комутаційні апарати з примусовим гашенням дуги).

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

Таблиця 1.2.
Відносна частота різних видів КЗ залежно від рівня напруги мережі

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

При КЗ можуть траплятися різні небезпечні наслідки.

◆ Недопустиме нагрівання електроустановки та його термічне пошкодження через значне зростання струмів (в 10...15 разів і більше).

◆ Виникнення великих механічних зусиль між струмоведучими частинами, які призводять до їх пошкодження або руйнування.

◆ Зниження напруги та спотворення її фазної симетрії, що негативно впливає на роботу споживачів енергії. Так, при зниженні напруги на 30...40 % протягом не менше секунди розпочинається процес гальмування електродвигунів, внаслідок чого можливі порушення технологічного циклу на

підприємствах, поява браку продукції та інші відхилення, пов'язані з народногосподарськими втратами.

◆ Наведення при несиметричних КЗ в сусідніх лініях зв'язку та сигналізації е.р.с., небезпечних для обслуговуючого персоналу і апаратури.

◆ Порушення стійкості роботи окремих елементів та режиму СЕП у цілому, що призводить до аварійних ситуацій з вимкненням значної кількості споживачів електричної енергії.

◆ Спалахування електроустановок.

Щоб забезпечити безперебійне електропостачання всіх споживачів, необхідно проектувати та споруджувати СЕП з урахуванням можливих КЗ, суворо дотримуючись правил експлуатації електроустановок, безперервно підвищуючи технічний рівень і якість виготовлення електроустаткування.

Розрахункові умови

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

Розрахунки режиму КЗ необхідні для вирішення таких завдань:

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

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

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

Розрахункова схема електроустановки – це схема з'єднань елементів системи електропостачання, де існують розрахункові умови КЗ для елемента, що розглядається, або іншого завдання. При виборі розрахункової схеми слід урахувувати передбачені для даної електроустановки умови її усталеної роботи і не зважати на короточасні зміни схеми, не передбачені для сталої експлуатації.

Розрахунковий струм КЗ слід визначати за обставин можливого пошкодження в такій точці мережі, коли при КЗ апарати та провідники мережі або системи захисту від цього пошкодження перебувають в найбільш важких або граничних за чутливістю умовах.

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

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

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

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

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

Основні принципи розрахунку струмів КЗ

Загалом для систем електропостачання великих підприємств урахування явищ, що характеризують процес КЗ, для розрахунку параметрів режиму –

справа трудомістка. Точне визначення струмів та напруг КЗ являє собою громіздке завдання, розв'язуване з використанням методів розрахунку, орієнтованих на застосування засобів обчислювальної техніки.

Для вирішення більшості практичних завдань проектування та експлуатації систем електропостачання допустима деяка похибка у визначенні струмів КЗ, значення якої необхідно співвідносити з цільовим призначенням розрахунку. Тому можливе введення низки обмежень та припущень, що ідеалізують та спрощують опис процесу КЗ і дають змогу використовувати уточнені або спрощені методи розрахунку.

В *уточнених методах* розрахунку струмів короткого замикання (наприклад, для проектування релейного захисту та системної автоматики) доцільно враховувати відповідні основні чинники:

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

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

в) комплексний характер навантаження;

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

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

Спрощені методи розрахунку струмів короткого замикання застосовують для вибору і перевірки електроустаткування за умовами КЗ, якщо їхня похибка не перевищує 5...10 %. В електроустановках напругою вище 1 кВ при розрахунку струмів КЗ для вибору апаратів чи провідників та визначення впливу на несучі конструкції виходять з названого далі:

- джерела, використані в живленні місця КЗ, працюють одночасно, з номінальним навантаженням;

- синхронні машини мають автоматичні регулятори напруги чи пристрої для форсування збудження;

- коротке замикання настає в такий момент часу, коли струм КЗ – з найбільшим значенням;

- електрорушійні сили всіх джерел живлення збігаються за кутом і зміни частоти обертання роторів синхронних машин не враховують, якщо тривалість КЗ не перевищить 0,5 с;

- розрахункова напруга кожного ступеня СЕП береться на 5 % вищою номінальної напруги;

- повинен враховуватися вплив на струми КЗ приєднаних до даного місця мережі синхронних компенсаторів, а також синхронних і асинхронних електродвигунів, що перейшли на генераторний режим роботи;
- не враховують насичення магнітних систем усіх елементів контуру живлення КЗ (генератори, трансформатори, електродвигуни);
- нехтують активними складовими опорів елементів схеми, якщо відношення складових опорів від джерела живлення до точки КЗ $r_{pez} / x_{pez} \leq 1/3$. Активні складові сумарних опорів беруть до уваги лише при визначенні міри затухання аперіодичних складових струмів КЗ;
- не враховують ємнісних провідностей на землю повітряних ліній напругою до 220 кВ (для кабельних ліній напругою 110 кВ і вище ємнісні провідності необхідно враховувати);
- вважають, що всі елементи СЕП симетричні, а порушення симетрії відбувається лише в місці КЗ;
- наближено враховують затухання аперіодичної складової струму КЗ у схемах з кількома незалежними контурами;
- не зважають на вплив живлення від комплексного навантаження, якщо струм у місці КЗ складе від останнього менше 5% струму КЗ, визначеного без урахування навантаження;
- не враховують різницю значень надперехідних індуктивних опорів поздовжньою та поперечною осями синхронних машин;
- нехтують струмами віток намагнічування трансформаторів та автотрансформаторів;
- не враховують підживлення місця КЗ від двигунів ступеня напруги до 1 кВ при розрахунку струмів КЗ у мережі вищою напругою.

В електроустановках напругою **понад 1 кВ** як розрахункові можна брати тільки індуктивні складові опорів електричних машин, силових трансформаторів та автотрансформаторів, реакторів, повітряних і кабельних ліній, а також струмопроводів. Активні складові опорів слід враховувати лише для повітряної лінії з проводом малого перетину чи сталевими проводами, а також для протяжних кабельних ліній малого перетину з порівняно великим активним опором.

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

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

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

При цьому рекомендується зважати на:

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

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

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Випадкове або навмисне, не передбачене нормальним режимом роботи, електричне з'єднання фаз(полюсів) струмоведучих кіл електроустановки між собою або з землею, при якому струми різко зростають в колах, що примикають до місця виникнення цього з'єднання, називається коротким замиканням.

2. Замикання – у випадках з'єднання з землею однієї фази (полюса) електроустановки, елементи якої працюють з ізольованою або резонансно заземленою нейтраллю.

3. В умовах експлуатації СЕП серед основних причин виникнення перехідних процесів – це переважно короткі замикання, які суттєво порушують нормальний режим роботи електроустановок.

4. При проектуванні СЕП короткі замикання розглядають як характерні збурення, що зумовлюють перехідні електромагнітні процеси.

5. За характером проходження КЗ поділяють на симетричні та несиметричні, стійкі та нестійкі, видозмінні.

6. При симетричному КЗ усі три фази електроустановки перебувають в однакових умовах.

7. Якщо при КЗ хоч одна з фаз різнитиметься від умов інших фаз, то його називають несиметричним КЗ.

8. До стійких КЗ в електроустановках зараховують такі, які зберігаються і після безструмової паузи комутаційного апарата.

9. До нестійких КЗ належать такі з них, поява яких самоліквідується за безструмової паузи комутаційного електричного апарата, який розмикає коло перебігу струму КЗ.

10. Видозмінним КЗ називають замикання в електроустановці з переходом одного виду КЗ в інший.

11. Випадкові КЗ виникають в результаті порушення ізоляції електроустановок внаслідок втрати властивостей ізоляції в процесі експлуатації електроустановки; перенапруг; прямих ударів блискавок; механічних пошкоджень.

12. Щоб забезпечити безперебійне електропостачання всіх споживачів, необхідно проектувати та споруджувати СЕП з урахуванням можливих КЗ, суворо дотримуючись правил експлуатації електроустановок, безперервно підвищуючи технічний рівень і якість виготовлення електроустановки.

13. Розрахунок електромагнітних перехідних процесів у системах електропостачання при коротких замиканнях передбачає обчислення значень напруг, струму та інших параметрів режиму КЗ у точці виникнення КЗ або в інших точках СЕП чи вітках мережі при заданих умовах.

14. Відповідно до цільового призначення розрахунку встановлюють розрахункові умови короткого замикання для аналізованого елемента СЕП.

15. Розрахункові умови КЗ – найбільш складні, але достатньо важливі, в яких може опинитися елемент електроустановки через різні види коротких замикань.

16. До сукупності первинних характеристик розрахункових умов входять розрахункові: *схема, вид струму КЗ, а також точка (місце), вид і тривалість КЗ.*

17. Розрахункова схема електроустановки – це схема з'єднань елементів системи електропостачання, де існують розрахункові умови КЗ.

18. Розрахунковий струм КЗ слід визначати за обставин можливого пошкодження в такій точці мережі, коли при КЗ апарати та провідники мережі або системи захисту від цього пошкодження перебувають в найбільш важких або граничних за чутливістю умовах.

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

20. Розрахунковий вид КЗ – це такий, при якому існують розрахункові умови КЗ для відповідного елемента СЕП.

21. Розрахункова тривалість КЗ встановлюється за допустимою дією на елемент СЕП струмів КЗ.

22. Точність обчислення параметрів режиму КЗ залежить від цільового призначення розрахунку.

23. Для вирішення більшості практичних завдань проектування та експлуатації систем електропостачання допустима деяка похибка у визначенні струмів КЗ,

24. В уточнених методах розрахунку струмів КЗ (наприклад, для проектування релейного захисту та системної автоматики) доцільно враховувати відповідні чинники.

25. Спрощені методи розрахунку струмів КЗ застосовують для вибору і перевірки електроустаткування за умовами КЗ, якщо їхня похибка не перевищує 5...10 %.

26. В електроустановках напругою понад 1 кВ як розрахункові можна брати тільки індуктивні складові опорів електричних машин, силових трансформаторів та автотрансформаторів, реакторів, повітряних і кабельних ліній, а також струмопроводів.

27. Електроустановки напругою до 1 кВ – в основному розподільні, розгалужені, із значною кількістю силових елементів, апаратів контролю та керування. Як правило, вони живляться від одного потужного джерела.

28. Розрахунки струмів КЗ у цих мережах виконують з тими ж припущеннями, що і в мережах напругою понад 1 кВ, але з урахуванням активних складових опорів силових елементів мережі.

Тестові питання по темі 2

1. Причини появи електромагнітних перехідних процесів в енергосистемі.
2. Які наслідки дії перехідних процесів?
3. Основні види коротких замикань та ймовірність їх виникнення.
4. Умови та основні припущення при розрахунках коротких замикань.
5. Як визначаються розрахункові умови? Які розрахункові параметри, їх характеристики?
6. У чому полягають основні принципи розрахунку перехідних процесів?
7. Які чинники визначають уточнені методи розрахунку?
8. Які чинники визначають спрощені методи розрахунку?
9. Вимоги, що визначають необхідність різних методів розрахунку.

ТЕМА 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Розрахункова схема

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

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

Кожен елемент розрахункової схеми характеризується наведеним складом паспортних показників визначення, необхідних для обчислення параметрів режиму з КЗ (*дивись підручник*).

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

Відповідні параметри елементів схеми заміщення наведено в *підручнику*.

Схема заміщення

Розрахункову схему системи електропостачання можна безпосередньо використовувати для обчислення струмів КЗ аналітичними методами. Вона містить реальні елементи (на різних ступенях напруги) з електромагнітними зв'язками, опорами втрат і розсіювання. З можливістю застосування методів

теорії електричних кіл у розрахунках струмів КЗ схему системи електропостачання слід подавати у вигляді електричного контуру. При цьому вважають, що КЗ – симетричне (несиметричні види КЗ розглядатимуться окремо в розд. 6–8) і перехідний процес аналізується в одній фазі. Для цього здійснюють перехід від розрахункової схеми до схеми заміщення, суть якого – в заміні окремих елементів електричними еквівалентами, з'єднаними у такій же послідовності.

Схема заміщення складається для кожної точки КЗ. Елемент позначають у вигляді дроби так: у *чисельнику* – його порядковий номер арабськими цифрами (номер повторюють і на розрахунковій схемі для даного елемента), а в *знаменнику* – значення опору або іншого показника. При обчисленні значень показників елементів схем заміщення потрібно врахувати:

- у спрощених методах розрахунку активні елементи (генеруючі джерела) розрахункової схеми заміщають еквівалентом у вигляді джерела електрорушійної сили та його опору, які визначаються для моменту часу $t=0$ (табл.). Обчислюючи параметри режиму КЗ при $t>0$, значення опорів елементів та струморозподіл у схемі передбачають незмінними для всіх моментів часу $t \geq 0$ перехідного процесу і рівними обчисленим;

- в уточнених методах розрахунку струмів КЗ у моменти часу перехідного процесу $t>0$: обчислюють для генеруючих джерел електроенергетичної системи показники е.р.с. E_i та опору x_i ; для *пасивних же елементів* ураховують зміну активної складової опору внаслідок нагрівання струмами КЗ.

Значення показників еквівалентів елементів у схемах заміщення визначають такими способами:

- 1) в іменованих одиницях виміру із зведенням (перерахунком) значень показників елементів до обраного основного ступеня напруги мережі з використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;

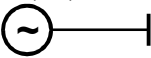
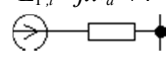
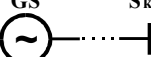
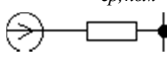
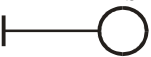
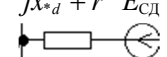
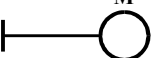
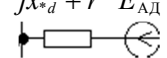
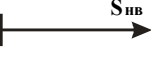
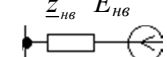
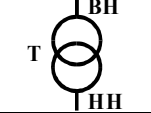
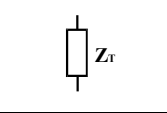
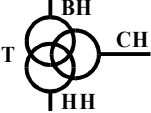
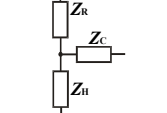
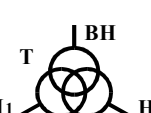
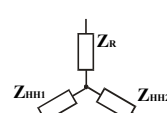
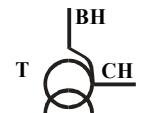
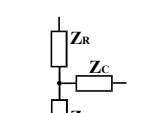
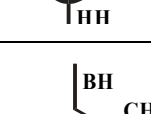
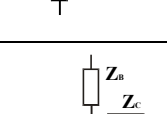

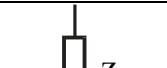
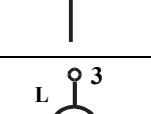
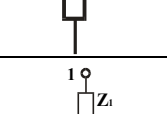

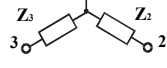
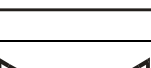

- 2) у відносних одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраних *базисних умов* з використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;

- 3) в іменованих одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраного *основного ступеня напруги* з використанням *наближеного* врахування коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;

- 4) у відносних одиницях виміру із зведенням значень показників елементів розрахункових схем до обраних *базисних умов* з використанням *наближеного* обліку коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів та автотрансформаторів;

- 5) в іменованих одиницях виміру із збереженням трансформаторних зв'язків (тобто без зведення значень показників елементів розрахункових схем до одного ступеня напруги) і використанням фактичних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів і автотрансформаторів.

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

Елемент	Позначення елемента в схемах	
	розрахунковий	заміщення
Генератор (синхронний компенсатор)	$G (GC)$ 	$E_{Г,д} \quad jX''_d + r$ 
Еквівалентне джерело системи	GS S_k 	$E'' = U_{ср,ном}$  $X''_C = X''_{сг}$
Синхронний двигун	MS 	$jX''_d + r \quad E''_{СД}$ 
Асинхронний двигун	M 	$jX''_d + r \quad E''_{АД}$ 
Узагальнене навантаження	$S_{нв}$ 	$Z_{нв} \quad E''_{нв}$ 
Двообмотковий трансформатор		
Триобмотковий трансформатор		
Трифазний трансформатор з обмоткою НН, розщепленою на дві частини		
Трифазний автотрансформатор		
Група однофазних трансформаторів з обмоткою НН, розщепленою на дві частини		
Одноланцюговий реактор		
Подвоєний реактор		
Повітряна лінія		
Кабельна лінія		

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

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

Зведення значень параметрів режиму $\dot{E}_i, \dot{U}_i, \dot{I}_i$ та опору \underline{Z}_i елемента в іменованих одиницях з i -го ступеня напруги, віддаленого від основного ступеня напруги кількома послідовно ввімкненими трансформаторами з фактичними коефіцієнтами трансформації n_1, n_2, \dots, n_m , здійснюється за співвідношеннями :

$$\begin{aligned}\hat{E} &= \dot{E}_i n_1 n_2 \dots n_m ; \\ \hat{U} &= \dot{U}_i n_1 n_2 \dots n_m ; \\ \hat{I} &= \dot{I}_i / (n_1 n_2 \dots n_m) ; \\ \hat{Z} &= \dot{Z}_i (n_1 n_2 \dots n_m)^2 .\end{aligned}\tag{3.1}$$

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

Якщо первинні параметри режиму $\dot{E}_{*(ном)}, \dot{U}_{*(ном)}, \dot{I}_{*(ном)}$ та опір $\underline{Z}_{*(ном)}$ елемента задані у відносних одиницях виміру щодо *номінальних умов* (номінальні напруга $U_{ном}$ та потужність $S_{ном}$ на i -му ступені напруги), то їхні зведені до основного ступеня напруги значення в іменованих одиницях виміру встановлюють за виразами:

$$\begin{aligned}\hat{E} &= \dot{E}_{*(ном)} U_{ном} n_1 n_2 \dots n_m ; \\ \hat{U} &= \dot{U}_{*(ном)} U_{ном} n_1 n_2 \dots n_m ; \\ \hat{I} &= \dot{I}_{*(ном)} S_{ном} / (\sqrt{3} U_{ном} n_1 n_2 \dots n_m) ; \\ \hat{Z} &= \underline{Z}_{*(ном)} U_{ном}^2 (n_1 n_2 \dots n_m)^2 / S_{ном} .\end{aligned}\tag{3.2}$$

У схемі заміщення, де значення показників елементів зведені за співвідношеннями (3.1) і (3.2), обчислені значення параметрів режиму будуть натуральними тільки для *основного ступеня напруги*. Для *іншого ж ступеня напруги* системи електропостачання натуральні значення струму та напруги визначають перерахуванням за відповідними коефіцієнтами трансформації трансформаторів між шуканим і основним ступенями.

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

- довільно вибраним значенням базисної потужності S_b (для спрощення розрахунку одного порядку з сумарною потужністю джерел живлення та кратної десяти, тобто 100, 1000);
- базисною напругою для ступеня напруги, що береться за основну, $U_{б,осн}$
- базисним струмом на основному ступені напруги:

$$I_{\bar{\sigma},осн} = S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3}U_{\bar{\sigma},осн}). \quad (3.3)$$

Для інших i -их ступенів напруги системи електропостачання базисну напругу обчислюють з урахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації, використовуючи формулу:

$$U_{\bar{\sigma},i} = U_{\bar{\sigma},осн} / (n_1 n_2 \dots n_{i-1}), \quad (3.3)$$

а базисний струм – за виразом:

$$I_{\bar{\sigma},i} = I_{\bar{\sigma},осн} (n_1 n_2 \dots n_{i-1}), \quad (3.3)$$

тобто для кожного ступеня напруги повинно зберігатися співвідношення:

$$S_{\bar{\sigma}} = \sqrt{3}U_{\bar{\sigma},i}I_{\bar{\sigma},i}. \quad (3.3)$$

Якщо первинні показники елемента розрахункової схеми $\dot{E}_i, \dot{U}_i, \dot{I}_i$ та \underline{Z}_i задані в іменованих одиницях виміру на i -му ступені напруги мережі системи електропостачання, то для зведення їх до базисних умов застосовують вирази:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{E}_i / U_{\bar{\sigma},i}; \\ \dot{U}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{U}_i / U_{\bar{\sigma},i}; \\ \dot{I}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{I}_i / U_{\bar{\sigma},i}; \\ \underline{Z}_{*(\bar{\sigma})} &= \underline{Z}_i S_{\bar{\sigma}} / U_{\bar{\sigma},i}^2, \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

Якщо первинні показники $\dot{E}_{*(ном)i}, \dot{U}_{*(ном)i}, \dot{I}_{*(ном)i}$ та $\underline{Z}_{*(ном)i}$ елемента i -го ступеня напруги розрахункової схеми задані у відносних одиницях виміру щодо номінальних показників елемента (номінальні потужність $S_{ном}$, напруга $U_{ном}$ струм $I_{ном}$), то їх зведення до базисних умов виконують за формулами:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{E}_{*(ном)i} U_{ном} / U_{\bar{\sigma},i}; \\ \dot{U}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{U}_{*(ном)i} U_{ном} / U_{\bar{\sigma},i}; \\ \dot{I}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{I}_{*(ном)i} [S_{ном} / (\sqrt{3}U_{ном})] (\sqrt{3}U_{\bar{\sigma},i} / S_{\bar{\sigma}}); \\ \underline{Z}_{*(\bar{\sigma})} &= \underline{Z}_{*(ном)i} (U_{ном}^2 / S_{ном}) (S_{\bar{\sigma}} / U_{\bar{\sigma},i}^2) \\ \underline{Z}_{*(\bar{\sigma})} &= \underline{Z}_{*(ном)i} (U_{ном} / I_{ном}) (I_{\bar{\sigma},i} / U_{\bar{\sigma},i}). \end{aligned} \quad (3.5)$$

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

на основному ступені напруги

$$\dot{I}_{к,осн} = \dot{I}_{*(\bar{\sigma}),к} I_{\bar{\sigma},осн}; \quad (3.6)$$

на інших i -их ступенях напруги

$$\dot{I}_{к,i} = \dot{I}_{*(\bar{\sigma}),к} I_{\bar{\sigma},i}. \quad (3.6)$$

3. *Наближене зведення* в іменованих одиницях виміру має своєю суттю *перерахування значень показників елементів розрахункової схеми до одного ступеня напруги, що береться за основний*. При цьому зведення базується на використанні *середніх значень коефіцієнтів трансформації* трансформаторів чи автотрансформаторів. Для кожного ступеня напруги визначається *середня*

номінальна напруга за шкалою, кВ: 1150; 750; 515; 400; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 1,21; 0,69; 0,4; 0,23; 0,133. Середні значення коефіцієнтів трансформації визначають рівними співвідношенням середніх номінальних напруг відповідних обмоток трансформатора або автотрансформатора. Враховуючи це, у формулах зведення (3.1) добуток коефіцієнтів трансформації для m послідовно ввімкнених між i -им та основним ступенями трансформаторів:

$$n_{cp, i} n_{cp, i+1} \dots n_{cp, m} = \frac{U_{cp, i+1}}{U_{cp, i}} \cdot \frac{U_{cp, i+2}}{U_{cp, i+1}} \dots \frac{U_{cp, осн}}{U_{cp, m}} = \frac{U_{cp, осн}}{U_{cp, i}}, \quad (3.7)$$

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

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

$$\begin{aligned} \widehat{E} &= \dot{E}_i (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) ; \\ \widehat{U} &= \dot{U}_i (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) ; \\ \widehat{I} &= \dot{I}_i / (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) ; \\ \widehat{Z} &= \underline{Z}_i (U_{cp, осн} / U_{cp, i})^2 . \end{aligned} \quad (3.8)$$

Якщо до основного ступеня напруги зводяться показники, задані на i -му ступені у відносних одиницях виміру (щодо номінальних умов), то слід використовувати вирази:

$$\begin{aligned} \widehat{E} &= \dot{E}_{*(ном)i} U_{cp, i} (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) = \dot{E}_{*(ном)i} U_{cp, осн} ; \\ \widehat{U} &= \dot{U}_{*(ном)i} U_{cp, i} (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) = \dot{U}_{*(ном)i} U_{cp, осн} ; \\ \widehat{I} &= \dot{I}_{*(ном)i} [S_{ном} / (\sqrt{3} U_{cp, i})] / (U_{cp, осн} / U_{cp, i}) = \\ &= \dot{I}_{*(ном)i} S_{ном} / (\sqrt{3} U_{cp, осн}) ; \\ \widehat{Z} &= \underline{Z}_{*(ном)i} (U_{cp, i}^2 / S_{ном}) (U_{cp, осн}^2 / U_{cp, i}^2) = \underline{Z}_{*(ном)i} U_{cp, осн}^2 / S_{ном} . \end{aligned} \quad (3.9)$$

Параметри режиму КЗ, обчислені за виразами (3.8) і (3.9), будуть натуральними для основного ступеня напруги, а для решти i -их ступенів напруги дійсні значення визначають перерахуванням за середніми значеннями коефіцієнтів трансформації, наприклад струму КЗ:

$$\dot{I}_{к, i} = \dot{I}_{к, осн} / (U_{cp, i} / U_{cp, осн}) . \quad (3.10)$$

4. *Наближене зведення у відносних одиницях виміру* – це перерахування до базисних умов значень показників елементів системи електропостачання за середніми значеннями коефіцієнтів трансформації (3.7). Базисні умови задають: базисними потужністю S_b і напругою $U_{б, осн}$, що беруть останню рівною середній номінальній напрузі основного ступеня $U_{б, осн} = U_{cp, осн}$; базисним струмом $I_{б, осн}$, що обчислюється залежністю (3.3).

На інших i -их ступенях напруги базисні умови визначаються:

- значенням базисної напруги i -го ступеня, яке внаслідок обчислення відповідно до виразу (3.3) з урахуванням виразу (3.7) дорівнює її *середній номінальній напрузі*, тобто $U_{б, i} = U_{cp, i}$;

- значенням базисного струму i -го ступеня:

$$I_{\bar{\sigma},i} = S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3}U_{cp,i}). \quad (3.11)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{E}_i(U_{cp,осн} / U_{cp,i}) / U_{cp,осн} = \dot{E}_i / U_{cp,i} ; \\ \dot{U}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{U}_i(U_{cp,осн} / U_{cp,i}) / U_{cp,осн} = \dot{U}_i / U_{cp,i} ; \\ \dot{I}_{*(\bar{\sigma})} &= [\dot{I}_i / (U_{cp,осн} / U_{cp,i})] / [S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3} \cdot U_{cp,осн})] = \\ &= \dot{I}_i / [S_{\bar{\sigma}} / \sqrt{3}U_{cp,i}] = \dot{I}_i / \dot{I}_{\bar{\sigma},i} ; \\ \underline{Z}_{*(\bar{\sigma})} &= \underline{Z}_i(U_{cp,осн} / U_{cp,i})^2 (S_{\bar{\sigma}} / U_{cp,осн}^2) = \underline{Z}_i S_{\bar{\sigma}} / U_{cp,i}^2 . \end{aligned} \quad (3.12)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{E}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{E}_{*(ном)i} U_{cp,i} (U_{cp,осн} / U_{cp,i}) / U_{cp,осн} = \dot{E}_{*(ном)i} ; \\ \dot{U}_{*(\bar{\sigma})} &= \dot{U}_{*(ном)i} U_{cp,i} (U_{cp,осн} / U_{cp,i}) / U_{cp,осн} = \dot{U}_{*(ном)i} ; \\ \dot{I}_{*(\bar{\sigma})} &= \{ \dot{I}_{*(ном)i} [S_{ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{cp,i})] / (U_{cp,осн} / U_{cp,i}) \} / \\ & / [S_{\bar{\sigma}} / (\sqrt{3}U_{cp,осн})] = \dot{I}_{*(ном)i} S_{ном} / S_{\bar{\sigma}} ; \\ \underline{Z}_{*(\bar{\sigma})} &= (\underline{Z}_{*(ном)i} U_{cp,i}^2 / S_{ном}) (U_{cp,осн} / U_{cp,i})^2 / \\ & / (U_{cp,осн}^2 / S_{\bar{\sigma}}) = \underline{Z}_{*(ном)i} S_{\bar{\sigma}} / S_{ном} . \end{aligned} \quad (3.13)$$

У кінцевому вигляді виразів (3.12) і (3.13) відсутня напруга основного ступеня, що спрощує розрахунки. Як бачимо з їх проміжних перетворень, вона враховується приховано.

Еквівалентні перетворення схем заміщення

Найчастіше основним завданням розрахунку режиму КЗ слугує визначення струму в аварійній вітці або точці КЗ. Тому схему заміщення системи електропостачання необхідно перетворити так, щоб аварійну вітку зберегти по можливості відокремленою до закінчення перетворення.

Шляхом еквівалентних перетворень схема заміщення системи електропостачання зводиться до найпростішого вигляду для визначення результуючого опору короткозамкненого контуру. З цією метою використовують відомі методи перетворення лінійних електричних ланцюгів: послідовне і паралельне складання опорів; заміна кількох джерел з різними електрорушійної сили та опорами, приєднаних до загальної точки мережі, одним еквівалентним джерелом; перетворення трикутника на еквівалентну зірку, зірки – на еквівалентний трикутник і багатопроменевої зірки – на *багатокутник* з діагоналями (табл. 3.1).

Таблиця 3.1
Еквівалентні перетворення схем

Вид перетворення	Схеми		Еквівалентні співвідношення
	первинна	еквівалентна	
Послідовне з'єднання			$Z_{ек} = \sum_{k=1}^n Z_k$
Паралельне з'єднання			$Z_{ек} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/Z_k)$
Заміна групи джерел еквівалентним			$\dot{E}_{ек} = Z_{ек} \sum_{k=1}^n (\dot{E}_k / Z_k);$ $Z_{ек} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/Z_k)$
Заміна трикутника зіркою			$Z_{123} = Z_{12} + Z_{31} + Z_{23};$ $Z_1 = Z_{12} Z_{31} / Z_{123};$ $Z_2 = Z_{12} Z_{23} / Z_{123};$ $Z_3 = Z_{23} Z_{31} / Z_{123}$
Заміна зірки трикутником			$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + Z_1 Z_2 / Z_3;$ $Z_{23} = Z_2 + Z_3 + Z_2 Z_3 / Z_1;$ $Z_{31} = Z_3 + Z_1 + Z_3 Z_1 / Z_2$

Складну схему заміщення системи електропостачання з кількома джерелами (рис. 3.1,а) можна перетворити з використанням коефіцієнтів струморозподілу на багатопроменеву схему заміщення з генеруючими променями до точки КЗ у вузлі променів (рис. 3.1,в). При перетворенні допускають рівність зведених електрорушійних сил джерел. Коефіцієнти струморозподілу характеризують відносну частку кожного джерела в живленні місця КЗ.

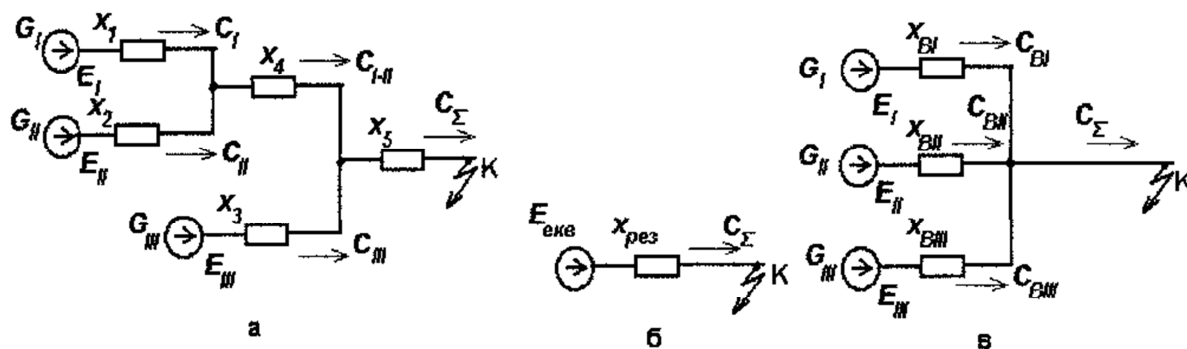


Рис. 3.1. Перетворення схеми заміщення з використанням коефіцієнтів струморозподілу: а – первинна складна; б – еквівалентна; в – багатопроменева

Перетворення здійснюють послідовно за правилами:
струм у місці КЗ умовно беруть рівним одиниці ($C_{\Sigma} = 1$);

коефіцієнти струморозподілу (свідчать про відносну частку струму КЗ, що перебігає вітками) порівнюють у генеруючих вітках первинної схеми заміщення (рис. 3.1,а) та відповідних променях нової схеми заміщення (рис. 3.1,в), тобто:

$$C_I = C_{BI}; C_{II} = C_{BII}; C_{III} = C_{BIII}. \quad (3.14)$$

При цьому для генеруючих віток обох схем заміщення виконують тотожності:

$$C_I + C_{II} + C_{III} = C_{\Sigma}; C_{BI} + C_{BII} + C_{BIII} = 1; \quad (3.15)$$

- результуючий опір первинної схеми заміщення (рис. 3.1, б) визначають об'єднанням нульових точок джерел живлення G_I, G_{II}, G_{III} , тобто:

$$x_{рез} = x_5 + x_3 \left[\frac{x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right] / \left[\frac{x_3 + x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right]; \quad (3.16)$$

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

$$\begin{aligned} C_{III} / C_{\Sigma} &= \left[\frac{x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right] / \left[\frac{x_3 + x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right]; \\ C_{I-II} / C_{\Sigma} &= x_3 / \left[\frac{x_3 + x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right]; \\ C_I / C_{I-II} &= \left[\frac{x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right] / x_1; \\ C_{II} / C_{I-II} &= \left[\frac{x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right] / x_2; \end{aligned} \quad (3.17)$$

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

$$\begin{aligned} C_{III} / C_{\Sigma} &= \left[\frac{x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right] / \left[\frac{x_3 + x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right]; \\ C_{I-II} / C_{\Sigma} &= x_3 / \left[\frac{x_3 + x_4 + x_1 x_2}{(x_1 + x_2)} \right]; \\ C_I &= C_{I-II} x_2 / (x_1 + x_2); \\ C_{II} &= C_{I-II} - C_I; \end{aligned} \quad (3.18)$$

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

$$\begin{aligned} x_{BI} &= C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BI}; \\ x_{BII} &= C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BII}; \\ x_{BIII} &= C_{\Sigma} x_{рез} / C_{BIII}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Якщо трифазне КЗ у вузлі з кількома вітками, то цей вузол можна розрізати, зберігши КЗ на кінці кожної окремої вітки. Отриману схему заміщення легко перетворити далі відносно будь-якої вітки з точкою КЗ, враховуючи інші вітки з КЗ як навантажувальні з е.р.с., рівними нулю. Такий прийом ефективний, коли необхідно знайти струм в одній з віток, приєднаних до вузла з КЗ.

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

Перетворення схем заміщення системи електропостачання спрощується, якщо трипроменеву зірку замінити еквівалентним трикутником, а потім розрізати по вершині, де прикладено електрорушійну силу.

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

$$S_{I_{ном}} x_{резI} / (S_{II_{ном}} x_{резII}) = 0,4 \dots 2,5. \quad (3.20)$$

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

При перетворенні схеми заміщення системи електропостачання джерело меншої потужності можна не враховувати, якщо:

$$x_{резI} / x_{резII} \geq 20 \text{ і } S_{I_{ном}} / S_{II_{ном}} \leq 0,05. \quad (3.21)$$

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

Отримані в умовах розглянутих перетворень еквівалентні електрорушійні сили джерел живлення та результуючі опори короткозамкненого кола є *первинні для визначення струмів і напруг при короткому замиканні.*

Спрощені перетворення схем заміщення

Показники елементів короткозамкненого кола розрахункової схеми зводять до базисних умов за залежностями 3.12 та 3.13. У практичних розрахунках опори (відн. од. виміру) для конкретних елементів короткозамкненого кола визначають за нижченаведеними формулами (розрахункові схеми та схеми заміщення окремих елементів – у табл.).

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

$$x_{*(\delta)} = x_{*d}'' S_{\delta} / S_{ном};$$

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

$$x_{*(\delta)} = (x_{*d}'' U_{ном}^2 / S_{ном}) / (U_{\delta,i}^2 / S_{\delta}); \quad (3.22)$$

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

Для *синхронних двигунів* $x_{*(ном)} = x_d'' \approx 1 / I_{*пуск}$, де $I_{*пуск} = I_{пуск} / I_{ном}$ – кратність пускового струму при пуску від повної напруги. Для *асинхронних двигунів* $x_{*(ном)} = x_*'' = 1 / I_{*пуск}$ (у формули (3.22) замість x_{*d}'' необхідно підставити x_*'').

Зведений опір джерел електроенергетичної системи:

$$x_{*(\delta)} = x_{*GS}'' S_{\delta} / S_{ном} \text{ або } x_{*(\delta)} = S_{\delta} / S_{K(t=0)} \approx I_{\delta,i} / I_{вим,ном}. \quad (3.23)$$

При ввімкненні трифазних двообмоткових трансформаторів на *i*-му ступені напруги з $U_{\delta,i} = U_{cp,i}$:

$$Z_{*(\delta)} = (u_K / 100) S_{\delta} / S_{ном};$$

$$r_{*(\delta)} = \Delta P_K S_{\delta} / S_{ном}^2; \quad (3.24)$$

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

Для трифазних трансформаторів (автотрансформаторів):

$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\bar{\sigma})B} &= 0,5(u_{\kappa,B-H} + u_{\kappa,B-C} - u_{\kappa,C-H})S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}); \\ Z_{*(\bar{\sigma})C} &= 0,5(u_{\kappa,B-C} + u_{\kappa,C-H} - u_{\kappa,B-H})S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}); \\ Z_{*(\bar{\sigma})H} &= 0,5(u_{\kappa,B-H} + u_{\kappa,C-H} - u_{\kappa,B-C})S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}); \\ r_{*(\bar{\sigma})B} &= r_{*(\bar{\sigma})C} = r_{*(\bar{\sigma})H} = 0,5\Delta P_{\kappa} S_{\bar{\sigma}} / S_{\text{НОМ}}^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

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

$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\bar{\sigma})B} &= u_{\kappa,B-HH} (1 - k_{\text{розщ}} / 4) S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}); \\ Z_{*(\bar{\sigma})HH1} &= Z_{*(\bar{\sigma})HH2} = u_{\kappa,B-C} k_{\text{розщ}} S_{\bar{\sigma}} / (200S_{\text{НОМ}}); \\ r_{*(\bar{\sigma})B} &= \Delta P_{\kappa,B-HH} S_{\bar{\sigma}} / S_{\text{НОМ}}^2; \\ r_{*(\bar{\sigma})HH1} &= r_{*(\bar{\sigma})HH2} = 2r_{*(\bar{\sigma})B}, \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

де $k_{\text{розщ}}$ – коефіцієнт розщеплення ($k_{\text{розщ}} = Z_{\text{розщ}} / Z_{\kappa,B-HH}$); $Z_{HH1} = Z_{HH2} = Z_{\text{розщ}} / 2$ За даними випробувань $k_{\text{розщ}} = 3,5$. При цьому:

$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\bar{\sigma})B} &= 0,125u_{\kappa,B-HH} S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}); \\ Z_{*(\bar{\sigma})HH1} &= r_{*(\bar{\sigma})HH2} = 1,75u_{\kappa,B-HH} S_{\bar{\sigma}} / (100S_{\text{НОМ}}). \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

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

$$Z_{*(\bar{\sigma})ск} = (u_{\kappa,B-HH} / 100) S_{\bar{\sigma}} / S_{\text{НОМ}}. \quad (3.28)$$

Опір трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням обчислюють залежно від регульованої напруги $U_{B,n}$ на даному розгалуженні n та напруги КЗ $u_{\kappa,n}$ за формулою:

$$Z_{*(\bar{\sigma})n} = (u_{\kappa,n} / 100)(U_{B,n}^2 / S_{\text{НОМ}}) / (U_{\bar{\sigma},i}^2 / S_{\bar{\sigma}}). \quad (3.29)$$

Напруга короткого замикання та відповідна йому напруга розгалуження, що входять до (3.29), визначаються для трьох положень регулятора регулювання напруги під навантаженням: середнього і двох крайніх. Установлюють розрахункові значення цих напруг, віднесених до номінальної потужності трансформатора та напруг відповідних розгалужень. Для триобмоткового трансформатора опори трипроменевої схеми заміщення розраховують за (29) після визначення за даними значеннями напруг КЗ обмоток

$$u_{\kappa,B-C,n}, u_{\kappa,B-H,n}, u_{\kappa,C-H,n}, u_{\kappa,B,n}, u_{\kappa,C,n}, u_{\kappa,H,n}$$

у середньому та крайніх положеннях регулятора регулювання напруги під навантаженням.

При ввімкненні однофазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН:

$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\bar{\sigma})B} &= 0; \\ Z_{*(\bar{\sigma})HH1} &= Z_{*(\bar{\sigma})HH2} = 2(u_{\kappa,B-HH} / 100) S_{\bar{\sigma}} / S_{\text{НОМ}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

а для однофазних трансформаторів з такою ж обмоткою:

$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\bar{o})B} &= 0,5(u_{\kappa,B-H} + u_{\kappa,B-C} - u_{\kappa,C-H})S_{\bar{o}} / (100S_{ном}); \\ Z_{*(\bar{o})C} &= 0,5(u_{\kappa,B-C} + u_{\kappa,C-H} - u_{\kappa,B-H})S_{\bar{o}} / (100S_{ном}); \\ Z_{*(\bar{o})HH_1} &= Z_{*(\bar{o})HH_2} = 2Z_{*CK}S_{\bar{o}} / S_{ном}; \\ Z_{*(\bar{o})HH} &= (Z_{*HH} - Z_{*CK})S_{\bar{o}} / S_{ном}, \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

де

$$\begin{aligned} Z_{*CK} &= (u_{\kappa,B-H} / 100) \parallel (u_{\kappa,C-H} / 100); \\ Z_{*HH} &= 0,5(u_{\kappa,B-H} + u_{\kappa,C-H} - u_{\kappa,B-C}) / 100. \end{aligned}$$

Зведений опір одноланцюгового реактора:

$$\begin{aligned} x_{*(\bar{o})} &= x_{ном} I_{\bar{o}} U_{p,ном} / (100 I_{p,ном} U_{\bar{o},i}); \\ r_{*(\bar{o})} &= \Delta P_{ном} S_{\bar{o}} / (I_{p,ном}^2 U_{\bar{o},i}^2), \end{aligned} \quad (3.32)$$

а для подвоєного:

$$\left. \begin{aligned} x_{*(\bar{o})1} &= x_{*(\bar{o})2} = (1 + k_{зв}) x_{ном} I_{\bar{o}} U_{p,ном} / (100 I_{p,ном} U_{\bar{o},i}); \\ x_{*(\bar{o})3} &= -k_{зв} x_{ном} I_{\bar{o}} U_{p,ном} / (100 I_{p,ном} U_{\bar{o},i}); \\ r_{*(\bar{o})1} &= r_{*(\bar{o})2} = \Delta P_{ном} S_{\bar{o}} / (I_{p,ном}^2 U_{\bar{o},i}^2); \\ r_{*(\bar{o})3} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Зведені опори лінії електропередачі:

$$\left. \begin{aligned} r_{*(\bar{o})} &= r_{num} l S_{\bar{o}} / U_{cp,i}^2; \\ x_{*(\bar{o})} &= x_{num} l S_{\bar{o}} / U_{cp,i}^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Розрахункова схема для аналізу аварійного режиму складається на основі принципової схеми системи електропостачання в *однолінійному* зображенні.

2. Принципова схема повинна відповідати схемі електричних з'єднань елементів системи електропостачання для умов нормальної експлуатації з найбільшою кількістю ввімкнених джерел живлення.

3. До розрахункової схеми вводять лише ті елементи системи електропостачання, які в аварійному режимі – як генеруючі джерела або з властивостями електричного опору в колі перебігу струму КЗ.

4. Залежно від завдання на розрахунковій схемі можна позначати декілька точок та видів КЗ.

5. Здійснюється визначення як *найбільших* (для перевірки електроустаткування на стійкість до дії струмів КЗ), так і *найменших* (для перевірки засобів релейного захисту) значень аварійних струмів, а також залишкових напруг у вузлах мережі. Аварійному режимові надається смислове значення відповідно до кінцевої мети розрахунку струму КЗ.

6. *Розрахункові умови* режиму визначають з урахуванням розвитку мережі.

7. Кожен елемент розрахункової схеми характеризується наведеним складом паспортних показників визначення, необхідних для обчислення параметрів режиму з КЗ (*дивись підручник*).

8. Розрахункову схему системи електропостачання можна безпосередньо використовувати для обчислення струмів КЗ аналітичними методами.

9. Здійснюють перехід від розрахункової схеми до схеми заміщення, суть якого – в заміні окремих елементів електричними еквівалентами, з'єднаними у такій же послідовності.

10. Схема заміщення складається для кожної точки КЗ.

У спрощених методах розрахунку активні елементи (генеруючі джерела) розрахункової схеми заміщають еквівалентом у вигляді джерела електрорушійної сили та його опору, які визначаються для моменту часу $t=0$.

11. В уточнених методах розрахунку струмів КЗ у моменти часу перехідного процесу $t > 0$: обчислюють для генеруючих джерел електроенергетичної системи показники е.р.с. та опору; для пасивних же елементів ураховують зміну активної складової опору внаслідок нагрівання струмами КЗ.

12. *Точне зведення в іменованих одиницях виміру* полягає в перерахуванні значень показників елементів на ступінь напруги, який називають основним.

13. *Зміст точного зведення у відносних одиницях виміру* – в перерахуванні значень показників елементів розрахункової схеми до базисних умов.

14. *Наближене зведення в іменованих одиницях виміру* має своєю суттю перерахування значень показників елементів розрахункової схеми до одного ступеня напруги, що береться за основний. При цьому зведення базується на використанні середніх значень коефіцієнтів трансформації трансформаторів чи автотрансформаторів.

15. *Наближене зведення у відносних одиницях виміру* – це перерахування до базисних умов значень показників елементів системи електропостачання за середніми значеннями коефіцієнтів трансформації.

16. Шляхом еквівалентних перетворень схема заміщення системи електропостачання зводиться до найпростішого вигляду для визначення результуючого опору короткозамкненого контуру.

17. Складну схему заміщення системи електропостачання з кількома джерелами можна перетворити з використанням *коефіцієнтів струморозподілу* на багатопроменеву схему заміщення з генеруючими променями до точки КЗ у вузлі променів. Коефіцієнти струморозподілу характеризують *відносну частку кожного джерела в живленні місця КЗ*.

18. Перетворення схем заміщення системи електропостачання спрощується, якщо трипроменеву зірку замінити еквівалентним трикутником, а потім розрізати по вершині, де прикладено електрорушійну силу.

19. Заміна двох або більше джерел живлення одним еквівалентним можлива, якщо джерела живлення перебувають практично в однакових умовах відносно точки КЗ.

20. При перетворенні схеми заміщення системи електропостачання джерело меншої потужності можна не враховувати.

21. Складні схеми заміщення системи електропостачання не обов'язково перетворювати аналітичним шляхом, а еквівалентувати за допомогою розрахункових моделей постійного або змінного струму.

Тестові питання по темі 3

1. Як визначається розрахункова схема (оцінка параметрів КЗ)?
2. Які припущення діють при формуванні розрахункових схем?
3. Як формуються схеми заміщення, можливі їх перетворення?
4. Яка мета перетворення схем заміщення?
5. Які чинники враховуються при розрахунку елементів схем заміщення?
6. Що описує точне зведення параметрів схеми заміщення (**іменовані** одиниці виміру)?
7. Що описує точне зведення параметрів схем заміщення (**відносні** одиниці виміру)?
8. Що визначає наближене зведення параметрів схем заміщення (**іменовані** одиниці виміру)?
9. Що визначає наближене зведення параметрів схем заміщення (**відносні** одиниці виміру)?
10. Як здійснюються еквівалентні перетворення схем заміщення, їх мета, можливості, основні залежності?
11. Як здійснюють спрощені перетворення схем заміщення, їх можливості, основні залежності?
12. Яка послідовність перетворень схем заміщення?
13. Що означає коефіцієнт струморозподілу? Як він визначається?

ТЕМА 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ СИНХРОННИХ МАШИН

Загальні положення

Перехідні процеси в машинах змінного струму досліджують нині на математичних моделях, побудованих відповідно до основних закономірностей перебігу процесів. Вибір необхідної адекватності моделі залежить від мети розрахунків та наявних обчислювальних засобів. При описанні електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів електричну машину розглядають як електродинамічну систему із сукупністю електричних кіл (обмоток) та обертової маси (ротора) (рис. 4.1.). Загалом поведінка такої системи описується в перехідному процесі системою диференціальних рівнянь, що зв'язують напругу кіл та моменти сил, діючих на ротор.

Магнітне поле в машинах змінного струму, збуджене струмом обмоток, через складну конфігурацію магнітної системи машин, своєрідне розміщення обмоток і нелінійність магнітної характеристики магнітопроводу *неоднорідне*. Тому точне визначення магнітного поля в синхронній машині – *досить складне завдання*.

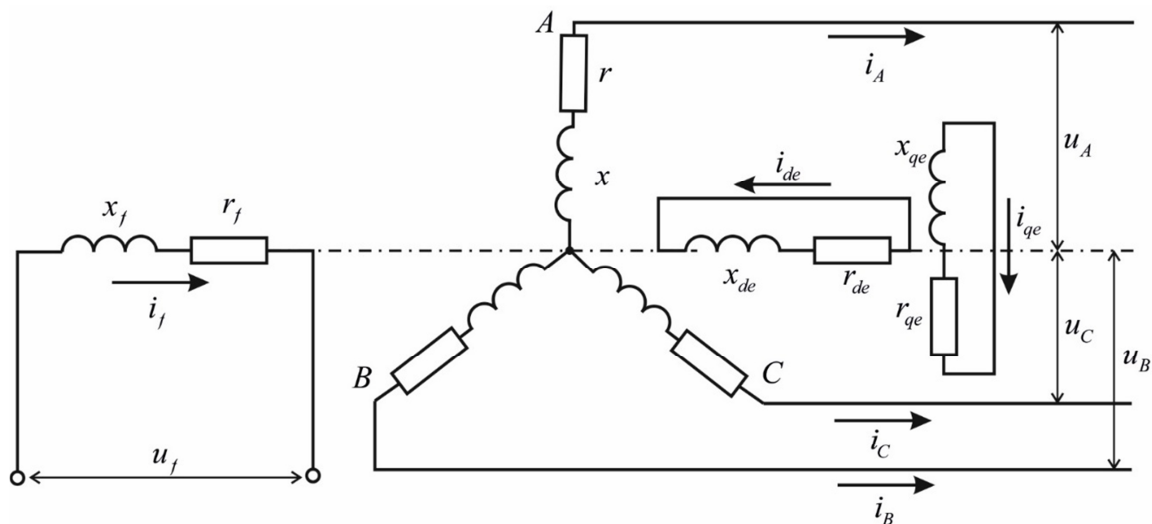


Рис. 4.1. Принципова схема синхронної машини з демпферними обмотками в поздовжній та поперечній осях ротора

У практичних розрахунках електромагнітних перехідних процесів при складанні, аналізі та розв'язку диференціальних рівнянь машини необхідна часткова ідеалізація (низка припущень) при описі магнітного поля. Це дає можливість отримати досить нескладні електромагнітні зв'язки при збереженні основних характеристик електромагнітного процесу в машині. Ідеалізація зводиться до зазначених нижче чинників.

Магнітна проникність сердечників магнітної системи машини береться нескінченною, що тотожно відсутності насичення. Це дозволяє однозначно отримати залежність стану магнітного поля від струму будь-якої обмотки, а також використати принцип накладення при визначенні результуючого поля в зазорі при спільній дії струмів усіх обмоток.

Розподіл полів самоіндукції трифазних обмоток та взаємоіндукції обмоток статора і ротора вздовж кола машини вважається *синусоїдальним*. Це дає змогу враховувати лише першу (як основну) гармоніку означених полів.

Магнітопровід у межах кожного полюсного поділу та стержня демпферних обмоток симетричний відносно поздовжньої та поперечної осей, всі фазні обмотки машини мають *однакову кількість витків*, активний опір та *взаємне зміщення магнітних осей*.

Усі демпферні обмотки синхронної машини подаються двома еквівалентними демпферними контурами – поздовжнім та поперечним, магнітні осі яких збігаються з осями d та q (d – через полюси ротора, а q – через міжполюсний простір) відповідно.

Ротор машини протягом аналізованого перехідного процесу обертається зі сталим значенням частоти.

Залежно від характеру перехідного процесу та призначення вирішуваного завдання можна використати не всі перелічені припущення, а обмежитися кількома.

Початкові рівняння електричних кіл синхронної машини

Систему диференціальних рівнянь, за якими визначають миттєві значення напруг електричних контурів з демпферними обмотками (залежність 4.1) в перехідному процесі, подамо таким чином:

$$\left. \begin{aligned} -u_A &= d\psi_A / dt + r i_A; \\ -u_B &= d\psi_B / dt + r i_B; \\ -u_C &= d\psi_C / dt + r i_C; \\ u_f &= d\psi_f / dt + r_f i_f; \\ 0 &= d\psi_{de} / dt + r_{de} i_{de}; \\ 0 &= d\psi_{qe} / dt + r_{qe} i_{qe}; \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де u_A, u_B, u_C – *фазні напруги* на затискачах обмоток статора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, i_A, i_B, i_C$ – *потокозчеплення* та струм фазних обмоток; r – *активний опір* фазних обмоток; u_f – *напруга*, прикладена до кола збудження; ψ_f, i_f – *потокозчеплення та струм* обмотки збудження; r_f – *активний опір* обмотки збудження.

У рівняннях для короткозамкнених демпферних контурів синхронної машини *потокозчеплення, струм та опір* у поздовжніх та поперечних колах позначені відповідними індексами – de та qe . Потокозчеплення з будь-якою обмоткою машини, що входять до системи диференціальних рівнянь (4.1), на основі прийнятої ідеалізації можна визначити у вигляді суми потокозчеплень само- та взаємоіндукції з усіма іншими обмотками (*детально це описується в нашому підручнику*):

$$\left. \begin{aligned}
 \psi_A &= L_{AA}i_A + M_{AB}i_B + M_{AC}i_C + M_{Af}i_f + M_{A,de}i_{de} + M_{A,qe}i_{qe}; \\
 \psi_B &= M_{BA}i_A + L_{BB}i_B + M_{BC}i_C + M_{Bf}i_f + M_{B,de}i_{de} + M_{B,qe}i_{qe}; \\
 \psi_C &= M_{CA}i_A + M_{CB}i_B + L_{CC}i_C + M_{Cf}i_f + M_{C,de}i_{de} + M_{C,qe}i_{qe}; \\
 \psi_f &= M_{fA}i_A + M_{fB}i_B + M_{fC}i_C + L_{ff}i_f + M_{f,de}i_{de}; \\
 \psi_{de} &= M_{de,A}i_A + M_{de,B}i_B + M_{de,C}i_C + L_{de}i_{de}; \\
 \psi_{qe} &= M_{qe,A}i_A + M_{qe,B}i_B + M_{qe,C}i_C + L_{qe}i_{de}.
 \end{aligned} \right\} (4.2)$$

Ураховуючи, що диференціальні рівняння напруг обмоток машини містять електрорушійну силу у вигляді похідної від потокозчеплення за часом, а потокозчеплення залежать від зміни струмів обмоток та індуктивностей, які є функцією часу, коефіцієнти L та M у системі рівнянь (4.1) – *змінні*. Розв’язок такої системи рівнянь для аналізу перехідних процесів викликає значні труднощі навіть за допомогою інформаційної техніки. Тому постало завдання перетворити диференціальні рівняння таким чином, щоб їх істотно спростити, отримавши з постійними коефіцієнтами. При вирішенні цього завдання використані закономірності зміни індуктивностей обмоток синхронної машини та лінійні перетворення, суть яких в тому, що первинні змінні в рівняннях заміщають новими змінними, лінійно зв’язаними з первинними. При цьому кількість нових змінних, введених до розгляду, дорівнює числу замінюваних змінних.

Рівняння опису електромагнітного перехідного процесу синхронної машини, які вперше й окремо один від одного запропонували вчені Р.Х.Парк та О.О.Горєв, отримали назву системи рівнянь Парка-Горєва. Детально це розглянуто в рекомендованому Вам підручнику.

До математичної моделі машин

Електромагнітні перехідні процеси в машинах змінного струму характеризують зміну електромагнітних параметрів робочого режиму при заданій частоті обертання. Незважаючи на обмеженість перебігу перехідного процесу в синхронній машині (0,1...0,3 с), останній суттєво впливає на визначення розрахункових параметрів машини та її конструктивних розмірів. Розрахункові характеристики в будь-який момент перехідного процесу, включаючи і початковий момент часу, можна визначити із загальних рівнянь електромагнітного перехідного процесу синхронної машини.

Аналітичне дослідження перехідного процесу в синхронній машині пов’язане з багатьма *труднощами*: кілька електричних контурів на роторі з різними параметрами за поздовжньою та поперечною осями, *вплив магнітної асиметрії* ротора тощо. Для спрощення опису та більшої наочності показники перехідного процесу у початковий момент часу визначають на основі принципу збереження первинного потокозчеплення синхронної машини.

Наявність індуктивностей в колах машини виключає раптові зміни струму, значення якого з самого початку перехідного процесу (за першим законом комутації) залишається таким же, як і в кінці попереднього режиму. При

новому режимі, проте, цей струм можна розглядати з складових і періодичної, обумовленої електрорушійною силою, яка наводиться магнітним потоком ротора, та аперіодичної, обумовленої зміною магнітного потоку статора.

Магнітний потік, зчеплений з ротором при раптовому порушенні первинного режиму, зберігається незмінним і відповідна йому наведена в статорі електрорушійна сила також незмінна. Ця умова дозволяє розглядати синхронну машину в початковий момент часу перехідного процесу як трансформатор.

З появою неусталеного режиму розрізняють:

- перехідний процес при відсутності демпферних обмоток на роторі синхронної машини;
- надперехідний процес у машинах з демпферними обмотками на роторі.

Оскільки струми в демпферних обмотках затухають значно швидше, ніж в обмотках збудження, з допустимою похибкою можна вважати, що в машинах з демпферними обмотками спочатку виникає надперехідний процес.

Відповідним чином визначається електрорушійна сила та індуктивні опори синхронної машини у *початковий момент часу перехідного процесу*.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Перехідні процеси в машинах змінного струму досліджують нині на математичних моделях, побудованих відповідно до основних закономірностей перебігу процесів. Вибір необхідної адекватності моделі залежить від мети розрахунків та наявних обчислювальних засобів.

2. При описанні електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів електричну машину розглядають як електродинамічну систему із сукупністю електричних кіл (обмоток) та обертової маси (ротора).

3. Магнітне поле в машинах змінного струму, збуджене струмом обмоток, через складну конфігурацію магнітної системи машин, своєрідне розміщення обмоток і нелінійність магнітної характеристики магнітопроводу неоднорідне.

4. У практичних розрахунках електромагнітних перехідних процесів при складанні, аналізі та розв'язку диференціальних рівнянь машини прийнята низка припущень.

5. Магнітна проникність сердечників магнітної системи машини береться нескінченною, що тотожно відсутності насичення.

6. Розподіл полів самоіндукції трифазних обмоток та взаємоіндукції обмоток статора і ротора вздовж кола машини вважається синусоїдальним.

7. Магнітопровід у межах кожного полюсного поділу та стержня демпферних обмоток симетричні відносно поздовжньої та поперечної осей, всі фазні обмотки машини мають однакову кількість витків, активний опір та взаємне зміщення магнітних осей.

8. Електромагнітні перехідні процеси в машинах змінного струму характеризують зміну електромагнітних параметрів робочого режиму при заданій частоті обертання. Розрахункові характеристики можна визначити із загальних рівнянь електромагнітного перехідного процесу синхронної машини.

9. Наявність індуктивностей в колах машини виключає раптові зміни струму.

10. Магнітний потік, зчеплений з ротором при раптовому порушенні первинного режиму, зберігається незмінним і відповідна йому наведена в статорі електрорушійна сила також незмінна.

Тестові питання по темі 4

1. Припущення, що використовуються при математичному опису синхронної машини?

2. Як описати перехідний процес синхронної машини системою диференціальних рівнянь у фазних координатах?

3. Як визначаються власні індуктивності фазних обмоток статора синхронної машини?

4. Як установити взаємні індуктивності фазних обмоток статора та обмоток ротора синхронної машини?

5. Як виконати лінійне перетворення систем координатних осей?

6. Що являє собою узагальнений вектор трифазної системи векторів?

7. Як здійснюється лінійне перетворення первинних рівнянь напруг синхронної машини?

8. Що описує система рівнянь Парка-Горєва?

9. Описати математичну модель синхронної машини.

ТЕМА 5 КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ

Основні принципи та умови

Для з'ясування змін струму при трифазному КЗ спочатку розглянемо найпростішу радіальну мережу (без трансформаторних зв'язків), яка живиться від джерела зі сталою напругою. Таке джерело називають *джерелом необмеженої потужності*; його граничне значення потужності теоретично не залежить від впливу зовнішніх умов (змін навантаження, кількості ввімкнених споживачів тощо). Практично це можливо при живленні системи електропостачання від потужних електроенергетичних систем і якщо КЗ виникає в малопотужних електроустановках або віддалених мережах.

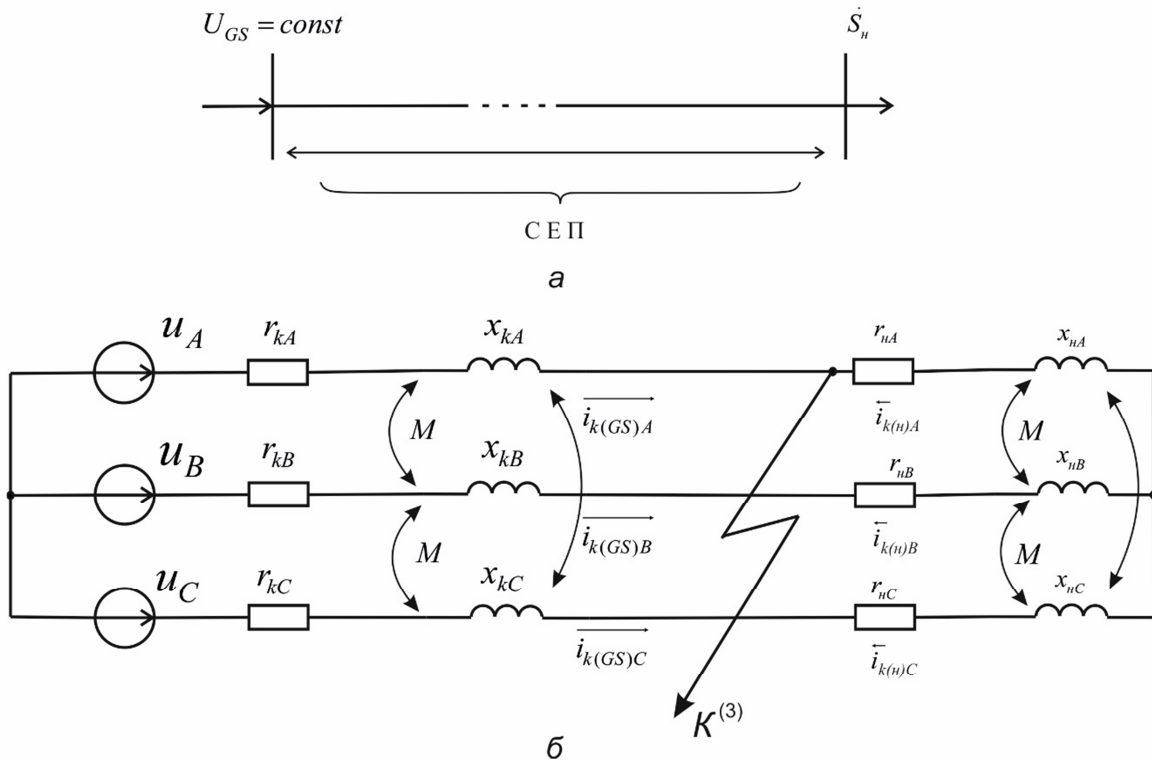


Рис. 5.1. Еквівалентне уявлення найпростішої електричної мережі:
а – розрахункова схема; б – трифазна схема заміщення при трифазному КЗ

На рис.5.1. зображено радіальну мережу, в якій раптово сталося трифазне КЗ та її трифазну схему заміщення із зосередженими опорами мережі і навантаження. Мережа живиться від джерела необмеженої потужності з фазними напругами $\dot{U}_{\max,A}$, $\dot{U}_{\max,B}$, $\dot{U}_{\max,C}$. До виникнення КЗ у мережі перебігають струми, миттєві значення яких i_A, i_B, i_C обумовлені напругою мережі та визначаються проекціями обертових векторів струму $\dot{I}_{\text{нв},\max,A}, \dot{I}_{\text{нв},\max,B}, \dot{I}_{\text{нв},\max,C}$ на вісь часу $t-t$ (на рис. 5.2. – проекції лише для фази A).

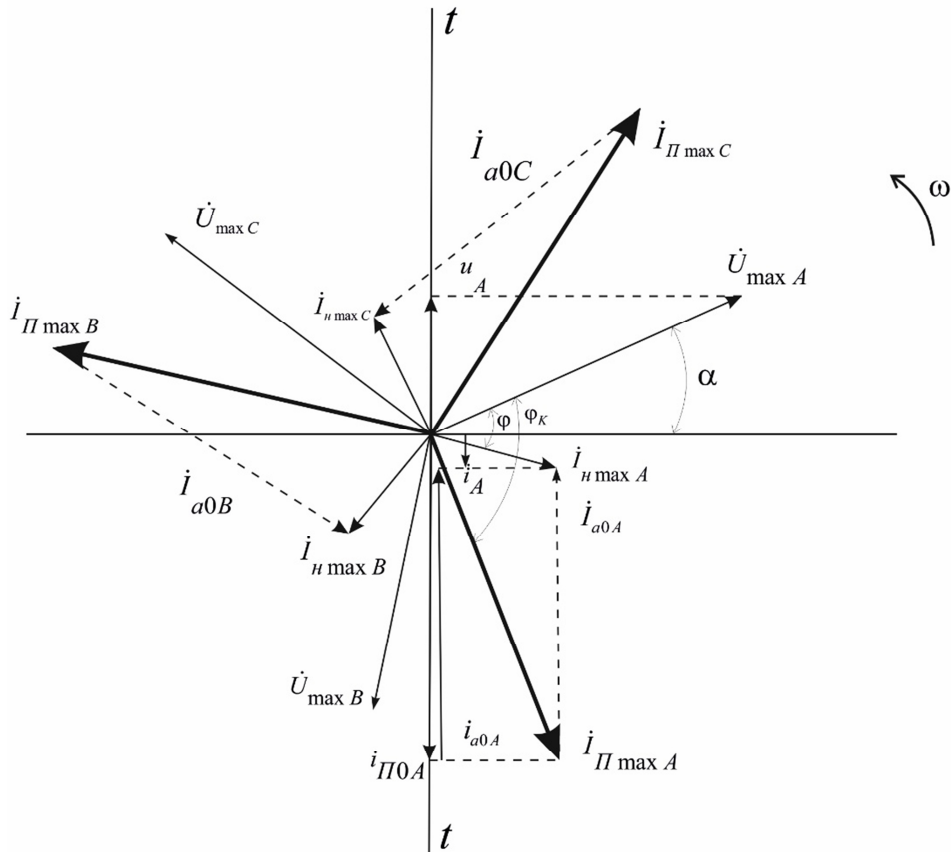


Рис. 5.2. Векторна діаграма струмів фаз у початковий момент часу виникнення трифазного КЗ для ділянки мережі з джерелом живлення

У момент виникнення КЗ мережа практично розпадається на дві частини: права шунтується від джерела точкою КЗ і залишається без зовнішнього живлення, а ліва продовжує жити від джерела необмеженої потужності зі сталою напругою.

Струм в зашунтованій частині мережі перебігає доти, поки запас електромагнітної енергії перетвориться на тепло в опорах елементів.

Для будь-якої фази можна записати рівняння, наприклад для фази А:

$$u_A = i_A r_{нв, A} + L_{нв, A} di_A / dt + M di_B / dt + M di_C / dt, \quad (5.1)$$

яке з урахуванням умов

$$u_A = 0;$$

$$i_A = -(i_B + i_C);$$

$$L_{нв} = L_{нв, A} - M; \quad r_{нв, A} = r_{нв, B} = r_{нв, C} = r_{нв}$$

перетвориться на рівняння універсального виду для кожної фази:

$$i_{к(нв)} r_{нв} + L_{нв} di_{к(нв)} / dt = 0. \quad (5.2)$$

Розв'язок рівняння відносно струму

$$i_{к(нв)} = i_{a(t=0)} \exp(-t / T_{a(нв)}),$$

який є вільним струмом і затухає за експонентним законом з постійною часу (залежність 5.3)

$$T_{a(нв)} = x_{нв} / (\omega r_{нв}). \quad (5.3)$$

Початкові значення вільного струму в фазах A, B, C зашунтованої ділянки мережі дорівнюють їх попереднім миттєвим значенням, оскільки з наявністю індуктивності в контурі раптової зміни струму *не може статися*. Незважаючи на те, що вільні струми в фазах затухають з однаковою постійною часу, їх *початкове значення різне*. Це визначається кутом зсуву між фазними струмами. Якщо, наприклад, у момент КЗ попередній струм в одній із фаз проходив через нуль, то вільний струм у такій фазі відсутній, а в інших *двох вільні струми будуть однаковими*, але протилежного спрямування.

На ділянці системи електропостачання з системним джерелом живлення при КЗ виникає, окрім вільного струму, новий вимушений струм, обумовлений напругою джерела. У зв'язку зі зменшенням внаслідок КЗ результуючого опору мережі порівняно з опором попереднього режиму нові вимушені струми $I_{\Pi,max,A}, I_{\Pi,max,B}, I_{\Pi,max,C}$ більші за струми попереднього режиму та різняться один від одного зсувом за фазою (рис. 5.2). Рівняння напруг для будь-якої фази короткозамкненої ділянки мережі можна подати так:

$$u = i_{k(GS)} r_k + L_k di_{k(GS)} / dt, \quad (5.4)$$

де $L_k = L_{k,A} - M$ – результуюча індуктивність фази (з урахуванням впливу двох інших фаз).

Розв'язок рівняння (5.4) має вигляд $i_{k(GS)t} = i_{\Pi(GS)t} + i_{a(GS)t}$ чи розгорнено:

$$i_{k(GS)t} = (U_{max} / Z_k) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a0} \exp(-t / T_{a(GS)}), \quad (5.5)$$

де Z_k – повний опір кола КЗ; φ_k – кут зсуву струму відносно напруги в цьому колі; $T_{a(GS)} = x_k / (\omega r_k)$ – постійна часу кола КЗ; α – фаза ввімкнення КЗ.

Із рівняння (5.5) виходить, що перший член правої частини являє собою вимушену (періодичну) складову струму $i_{\Pi(GS)t} \equiv i_{\Pi t}$ з *постійною амплітудою* $I_{\Pi max} = U_{max} / Z_k$, а другий член – вільну (аперіодичну) складову струму $i_{a(GS)t} = i_{at}$, затухаючу за *експонентою з постійною часу* $T_{a(GS)} = T_{a,k}$.

За першим законом комутації початкове значення повного струму КЗ дорівнює значенню струму попереднього режиму в момент виникнення КЗ та складається (рис. 5.2) із складових (періодичної та аперіодичної) (залежність б):

$$i_{k0} = i_{нв0} = i_{\Pi 0} + i_{a0},$$

Звідки

$$i_{a(0)} = i_{k(0)} - i_{\Pi(0)} = I_{нв,max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{\Pi,max} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (5.6)$$

Ураховуючи, що миттєві значення струмів $i_{\Pi 0}$ і i_{k0} – *проекції векторів* $\dot{I}_{\Pi,max}$ та $\dot{I}_{нв,max}$ на вісь часу, i_{a0} є проекцією вектора аперіодичної складової струму $(\dot{I}_{нв,max} - \dot{I}_{\Pi,max})$ на ту саму вісь (рис. 5.2). Залежно від фази ввімкнення α (кут між напругою $U_{max,A}$ та горизонталлю) початковий аперіодичний струм i_{a0} може змінюватися від *найбільшого значення*, коли вектор $(\dot{I}_{нв,max} - \dot{I}_{\Pi,max})$ *буде паралельним осі $t-t$* , до нуля при *перпендикулярному розташуванні* цього вектора відносно осі часу.

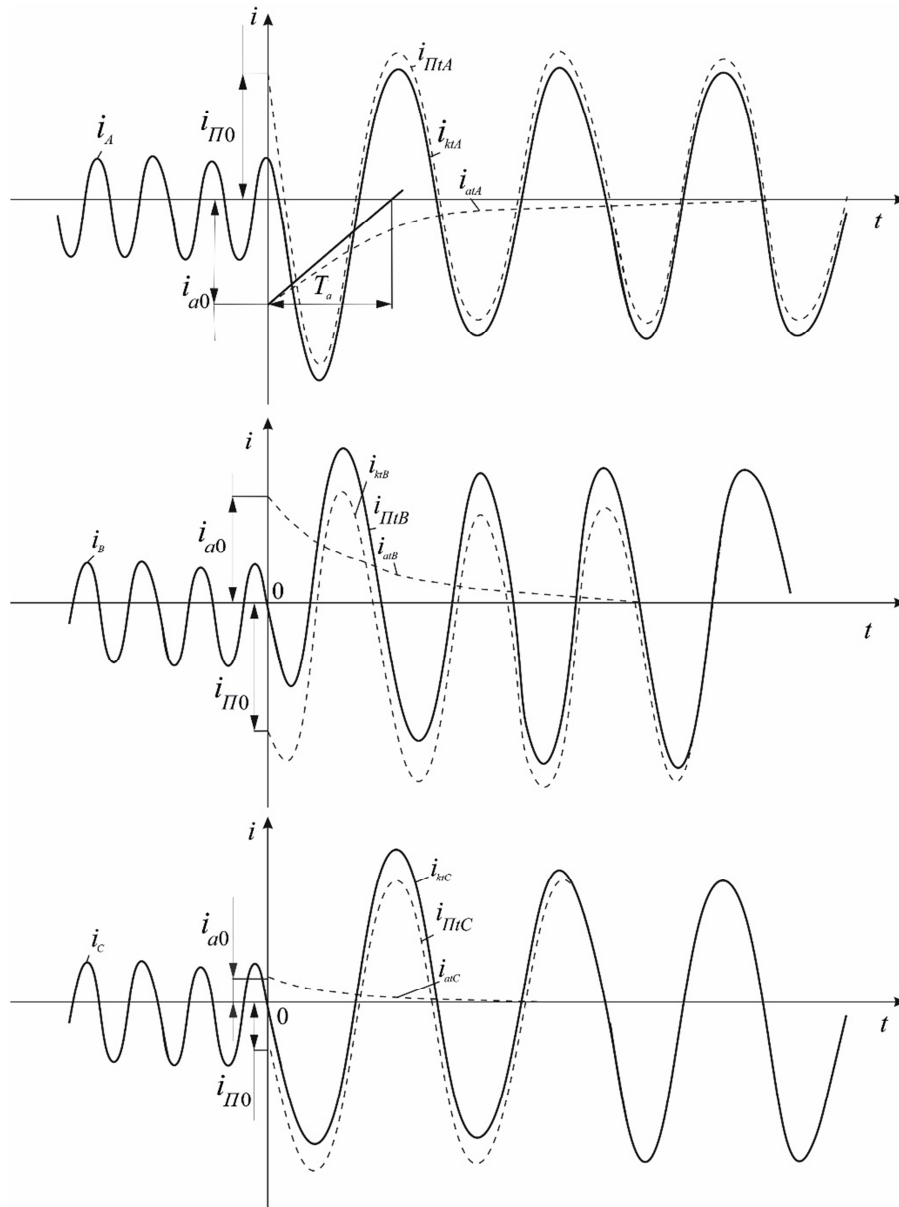


Рис. 5.3. Залежності зміни у часі повного струму та його складових у фазах А, В, С при трифазному КЗ у найпростішій електричній мережі

На рис. 5.3 подані залежності зміни у часі струму та його складових у фазах короткозамкненої ділянки мережі при трифазному КЗ. Чим більше значення аперіодичної складової струму КЗ, тим *сильніше зміщення кривої струму* відносно осі часу.

Таким чином, в обох частинах системи електропостачання визначені струми, які становлять складові повного струму в місці КЗ:

$$i_{kt} = i_k(GS) + i_k(nB)$$

або

$$i_{kt} = I_{\Pi,max} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_k) + i_{a(GS)0} \times \exp(-t / T_{a(GS)}) + i_{a(nB)0} \exp(-t / T_{a(nB)}). \quad (5.7)$$

У розрахунках, зорієнтованих на вибір та перевірку елементів системи електропостачання за умовами роботи в перехідних режимах з КЗ, визначають найбільший струм, який перебігає встановленим електроустаткуванням. Тоді за те значення, яке необхідно врахувати, беруть найбільше з складових рівняння (5.7). Здебільшого це буде струм, що перебігає від джерела електроенергетичної системи (індекси належності до ділянок систем електропостачання "GS", "нв" надалі випускаємо).

Розглянутий математичний опис процесу струму перехідного режиму в обох частинах системи електропостачання відносно точки КЗ свідчить про його ідентичність для всіх трьох фаз трифазної мережі. Це підтверджує достатність розгляду при трифазних КЗ схем заміщення для однієї фази.

Граничні значення струмів

Для перехідного режиму, що виникає внаслідок КЗ, звичайно знаходять граничні значення його показників. Траєкторію зміни аперіодичної складової струму можна сприйняти як криволінійну вісь симетрії кривої повного струму КЗ. Через аперіодичну складову повний струм змінюється за законом, який відрізняється від *синусоїдального*. Найбільше значення аперіодичної складової струму КЗ залежить не лише від фази ввімкнення α , але й від струму навантаження мережі в попередньому режимі. Якщо струм навантаження в момент КЗ проходить через нульове значення $i_{нв0} = 0$, то аперіодична складова в початковий час перехідного процесу i_{a0} дорівнює *амплітуді періодичної складової* $I_{П, max}$ (рис. 5.4).

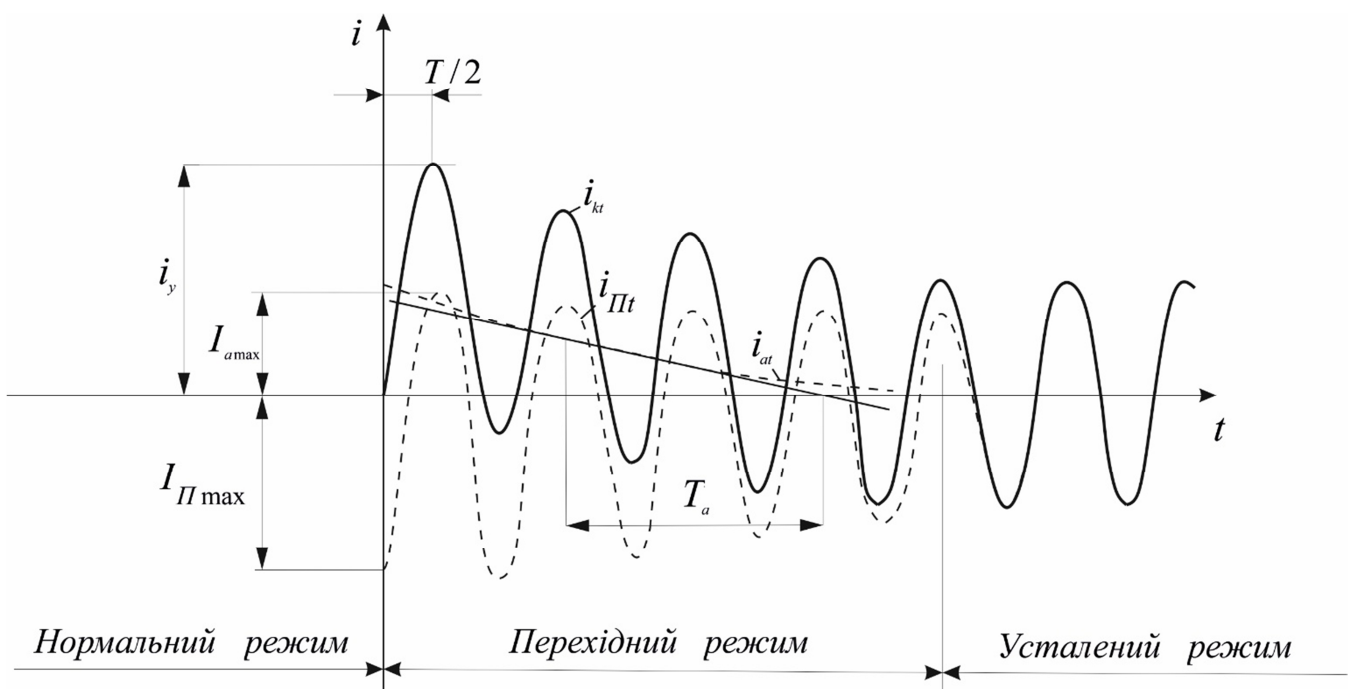


Рис. 5.4. Зміни у часі струму КЗ та його складових при найбільшому початковому значенні аперіодичної складової

Якщо з виразу (5.6) до рівняння (5.5) підставити значення i_{a0} за умови, що значення струму навантаження $I_{нв, max} \sin(\alpha - \varphi) = 0$, тоді повний струм КЗ стане *функцією незалежних змінних*: часу t та фази ввімкнення α . Спільний розв'язок виразів часткових похідних рівняння:

$$\begin{cases} \partial i_{кт} / \partial t = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \\ + (1/T_a) \sin(\alpha - \varphi_k) \exp(-t/T_a) = 0; \\ \partial i_{кт} / \partial \alpha = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \\ - \cos(\alpha - \varphi_k) \exp(-t/T_a) = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

дає можливість визначити умову, коли відбувається максимум повного миттєвого струму КЗ:

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_k) = -\omega T_a = -x_k / r_k = \operatorname{tg}(-\varphi_k). \quad (5.9)$$

Це справедливо при $\alpha=0$ (у момент виникнення КЗ зміна напруги джерела проходить через нульове значення).

У колах з переважним індуктивним опором $\varphi_k \rightarrow 90^\circ$. Тому умови виникнення найбільших значень аперіодичної складової та миттєвого значення повного струму практично збігаються. При розрахунках струмів КЗ максимальний миттєвий повний струм визначають за найбільшого значення аперіодичної складової (рис. 5.4) і вважають, що він відбувається приблизно через півперіоду ($t=0,01$ с при $f=50$ Гц) після замикання.

Перше найбільше миттєве значення повного струму КЗ у фазах називають ударним струмом короткого замикання:

$$i_y = I_{II, max} + i_{a, t=0,01}. \quad (5.10)$$

Ураховуючи, що i_y має найбільше значення за умови $I_{II, max} = I_{a, max}$, а $i_{a, t=0,01} = I_{a, max} \exp(-0,01/T_a)$, вираз (5.7) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} i_y &= I_{II, max} + I_{II, max} \exp(-0,01/T_a) = \\ &= I_{II, max} [1 + \exp(-0,01/T_a)] = k_y I_{II, max}, \end{aligned} \quad (5.11)$$

де

$$k_y = 1 + \exp(-0,01/T_a). \quad (5.12)$$

Параметр k_y називають ударним коефіцієнтом, який характеризує перевищення ударного струму над амплітудою періодичної складової. Його значення – у межах $1 < k_y < 2$, що відповідає граничним значенням постійної часу $T_a [0; \infty]$.

Залежність ударного коефіцієнта від постійної часу T_a або відношення x_k / r_k зображено на рис. 5.5. За час, який дорівнює $3T_a$, аперіодична складова струму КЗ практично затухає (менше 5% від її початкового значення).

У розгалужених мережах точне визначення постійних часу потребує значних обчислень. При наявності в мережі кількох контурів результуюча аперіодична складова струму КЗ дорівнює сумі їх аперіодичних струмів. Вільний струм в будь-якій вітці такої схеми можна визначити шляхом розкладання струму КЗ, вираженого в операторній формі.

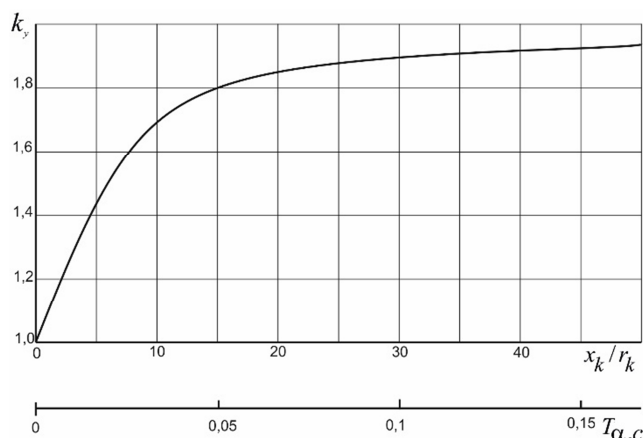


Рис. 5.5. Залежність ударного коефіцієнта від відношення складових повного результуючого опору мережі або її постійної часу

Для інженерних рішень користуються наближеним вирішенням. Припускають, що аперіодична складова струму КЗ затухає (за експонентним законом) з еквівалентною постійною часу:

$$T_{a,ек} \approx x_{к,ек} / (\omega r_{к,ек}), \quad (5.13)$$

де $x_{к,ек}$ – результуючий індуктивний опір схеми відносно точки КЗ, обчислений за умови, що всі активні опори дорівнюють нулю; $r_{к,ек}$ – результуючий активний опір, обчислений для всіх індуктивних опорів, якщо $x = 0$.

При такому визначенні $T_{a,ек}$ спостерігається еквівалентність кількості електрики в дійсних та зведених умовах. Таким чином, аперіодичний струм КЗ складної схеми подається однією еквівалентною експонентою (залежність 5.14)

$$i_{at} = i_{a(t=0)} \exp(-t / T_{a,ек}). \quad (5.14)$$

Співвідношення індуктивних та активних складових опорів для елементів електричної мережі мають такі значення:

Елемент	Відношення x/r
Турбогенератори	15 – 150
Гідрогенератори	40 – 90
Трансформатори	7 – 50
Реактори 6-10 кВ	15 – 80
Повітряні лінії	2 – 8
Кабельні лінії 6-10 кВ	0,2 – 0,8
Узагальнене навантаження	2,5

Наведені відношення x/r використовують для оцінки еквівалентних постійних часу затухання аперіодичної складової при розрахунках струму КЗ у системі електропостачання. Орієнтовно для наближених розрахунків можна брати значення відношення x/r , ударного коефіцієнта k_y та постійної часу T_a характерних віток системи електропостачання з табл.

Для визначення діючого значення повного струму КЗ та його складових необхідно знати закономірності їх змін у часі. Розрахунок їх діючого значення досить утруднений, оскільки напруга джерела загалом може змінюватися за амплітудою (джерело обмеженої потужності), а повний струм та його періодична складова являють собою складні функції часу (несинусоїдальні).

Таблиця 5.1

Середні значення параметрів (x/r , k_y , T_a) для характерних відгалужень

Мережа або місце КЗ	$\frac{x}{r}$	k_y	T_a
Мережа генератор-трансформатор	30-50	1,9-	0,1-0,2
Мережа живлення асинхронного двигуна	6,3	1,6	0,02
КЗ за лінійним реактором на електростанції	30	1,9	0,1
КЗ за лінійним реактором на підстанції	18-20	1,85	0,06
КЗ за кабельною лінією 6-10 кВ	3	1,4	0,01
КЗ за трансформатором потужністю 1000 кВ·А	6,3	1,6	0,02
КЗ на приєднанні первинної напруги підстанції	15	1,8	0,5
КЗ на приєднанні вторинної напруги підстанції	20	1,85	0,06

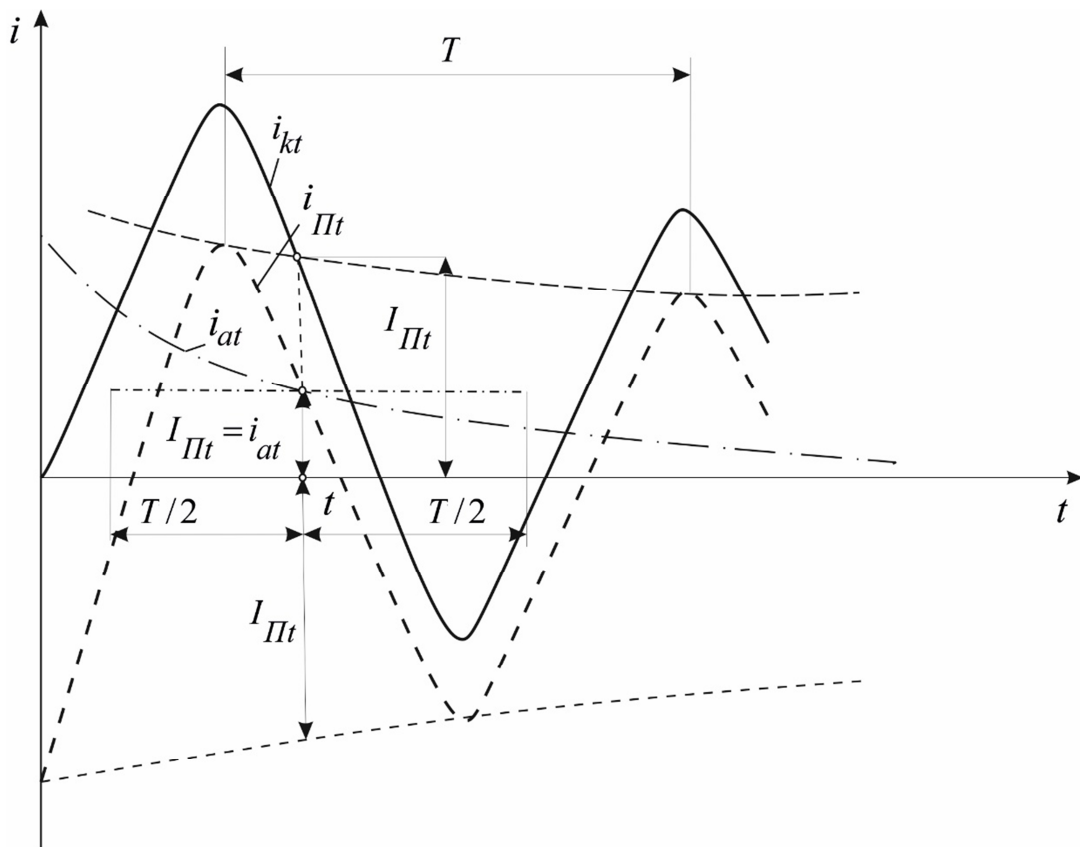


Рис. 5.6. До визначення діючого значення струму в перехідному процесі

Діюче значення повного струму КЗ у довільний момент часу t перехідного процесу визначають як середньоквадратичне значення струму за період T , в середині якого міститься даний момент часу. При цьому припускають, що протягом періоду T амплітуда періодичної та аперіодичної складових не змінюється, дорівнюючи їх значенням у час t , що розглядається на рис. 5.6. Амплітуду періодичної складової визначають за обвідною кривою в середині періоду T , а її діюче значення в цей момент часу $I_{\Pi} = I_{\Pi, \max} / \sqrt{2}$. Діюче значення аперіодичної складової струму дорівнює її миттєвому значенню в середині періоду $I_{at} = i_{at}$.

Діюче значення повного струму КЗ для будь-якого моменту часу:

$$I_{\kappa t} = \sqrt{I_{\Pi}^2 + I_{at}^2}, \quad (5.15)$$

яке відповідає виразу для визначення діючого значення несинусоїдального струму.

Діюче значення ударного струму КЗ I_y , за яким вибирають та перевіряють електричні апарати, припадає на перший період перехідного процесу. Воно визначається з припущенням, що аперіодична складова протягом періоду дорівнює її миттєвому значенню при $t=0,01$ с, а періодична складова – своєму амплітудному значенню. За цієї умови:

$$\begin{aligned} I_y &= \sqrt{I_{\Pi}^2 + i_{a,t=0,01}^2} = \\ &= \sqrt{I_{\Pi}^2 + [I_{a, \max} \exp(-0,01 / T_a)]^2}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

При $I_{a, \max} = I_{\Pi, \max} = \sqrt{2} I_{\Pi}$ і враховуючи, що $\exp(-0,01 / T_a) = (k_y - 1)$, вираз (5.16) подамо у вигляді:

$$I_y = I_{\Pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (5.17)$$

При значеннях ударного коефіцієнта $1 < k_y < 2$ відношення I_y / I_{Π} перебуває в межах $1 < I_y / I_{\Pi} < \sqrt{3}$, а відношення i / I_y має найбільше значення $\sqrt{3}$ при $k_y = 1,5$.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Найпростіша радіальна мережа (без трансформаторних зв'язків) живиться від джерела зі сталою напругою.

2. Таке джерело називають *джерелом необмеженої потужності*.

3. Його граничне значення потужності теоретично не залежить від впливу зовнішніх умов (змін навантаження, кількості ввімкнених споживачів тощо).

4. У момент виникнення КЗ мережа практично розпадається на дві частини: права шунтується від джерела точкою КЗ і залишається без зовнішнього живлення, а ліва продовжує жити від джерела необмеженої потужності зі сталою напругою.

5. Струм в зашунтованій частині мережі перебігає доти, поки запас електромагнітної енергії перетвориться на тепло в опорах елементів.

6. Початкові значення вільного струму в фазах зашунтованої ділянки мережі дорівнюють їх попереднім миттєвим значенням, оскільки з наявністю індуктивності в контурі раптової зміни струму не може статися.

7. Незважаючи на те, що вільні струми в фазах затухають з однаковою постійною часу, їх *початкове значення різне*.

8. На ділянці системи електропостачання з системним джерелом живлення при КЗ виникає, окрім вільного струму, новий вимушений струм, обумовлений напругою джерела.

9. Чим більше значення аперіодичної складової струму КЗ, тим *сильніше зміщення кривої струму відносно осі часу*.

10. У розрахунках, зорієнтованих на вибір та перевірку елементів системи електропостачання за умовами роботи в перехідних режимах з КЗ, визначають найбільший струм.

11. Математичний опис процесу струму перехідного режиму в обох частинах системи електропостачання відносно точки КЗ свідчить про його ідентичність для всіх трьох фаз трифазної мережі. Це підтверджує достатність розгляду при трифазних КЗ схем заміщення для однієї фази.

12. Для перехідного режиму, що виникає внаслідок КЗ, звичайно знаходять граничні значення його показників.

13. Траєкторію зміни аперіодичної складової струму можна сприйняти як криволінійну вісь симетрії кривої повного струму КЗ.

14. Через аперіодичну складову *повний струм* змінюється за законом, який відрізняється від *синусоїдального*.

15. Найбільше значення аперіодичної складової струму КЗ залежить не лише від фази ввімкнення, але й від струму навантаження мережі в попередньому режимі.

16. Якщо струм навантаження в момент КЗ проходить через нульове значення, то аперіодична складова в початковий час перехідного процесу дорівнює амплітуді періодичної складової.

17. У колах з переважним індуктивним опором умови виникнення найбільших значень аперіодичної складової та миттєвого значення повного струму практично збігаються.

18. При розрахунках струмів КЗ максимальний миттєвий повний струм визначають за найбільшого значення аперіодичної складової.

19. Перше найбільше миттєве значення повного струму КЗ у фазах називають ударним струмом короткого замикання.

20. Ударний коефіцієнт характеризує перевищення ударного струму над амплітудою періодичної складової. Його значення – у межах $1 < k_y < 2$, що відповідає граничним значенням постійної часу.

21. При наявності в мережі кількох контурів результуюча аперіодична складова струму КЗ дорівнює сумі їх аперіодичних струмів.

22. Вільний струм в будь-якій вітці такої схеми можна визначити шляхом розкладання струму КЗ, вираженого в операторній формі.

23. Для визначення діючого значення повного струму КЗ та його складових необхідно знати закономірності їх змін у часі.

24. Діюче значення повного струму КЗ у довільний момент часу t перехідного процесу визначають як середньоквадратичне значення струму за період, в середині якого міститься даний момент часу.

25. Діюче значення ударного струму КЗ, за яким вибирають та перевіряють електричні апарати, припадає на перший період перехідного процесу, визначається з припущенням, що аперіодична складова протягом періоду дорівнює її миттєвому значенню при $t=0,01$ с, а періодична складова – своєму амплітудному значенню.

Тестові питання по темі 5

1. Описати властивості електронної мережі.
2. Умови, що визначають аварійний режим електричної мережі.
3. Пояснити умови виникнення короткого замикання (звернутися до векторної діаграми струмів).
4. Що визначає вимушений струм, яка його фізична сутність?
5. Пояснити фізичну сутність залежностей зміни у часі повного ьструму та його складових при трифазному замиканні.
6. Які умови виникнення ударного струму короткого замикання?
7. Що означає ударний коефіцієнт, в яких межах він змінюється?
8. Як визначається ударний струм короткого замикання (миттєве та діюче значення)?
9. Пояснити фізичну сутність визначення діючого значення струму в перехідному процесі.

ТЕМА 6 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ

Процес короткого замикання на затискачах генератора

Раптове трифазне КЗ на затискачах генератора – причина найбільш небезпечного аварійного режиму. Результируючий опір, утворений короткозамкненим колом, стає при цьому рівним лише внутрішньому опорі генератора, а *перехідний процес* супроводжується максимальними змінами напруги та струму. Процес викликає також появу аперіодичного струму, який накладається на періодичний струм від джерела живлення. Співвідношення для їх розрахунку залишаються попередніми. Залежності зміни струму та його складових в одній з фаз мережі при трифазному КЗ на затискачах генератора без пристрою АРЗ показані на рис. 6.1.

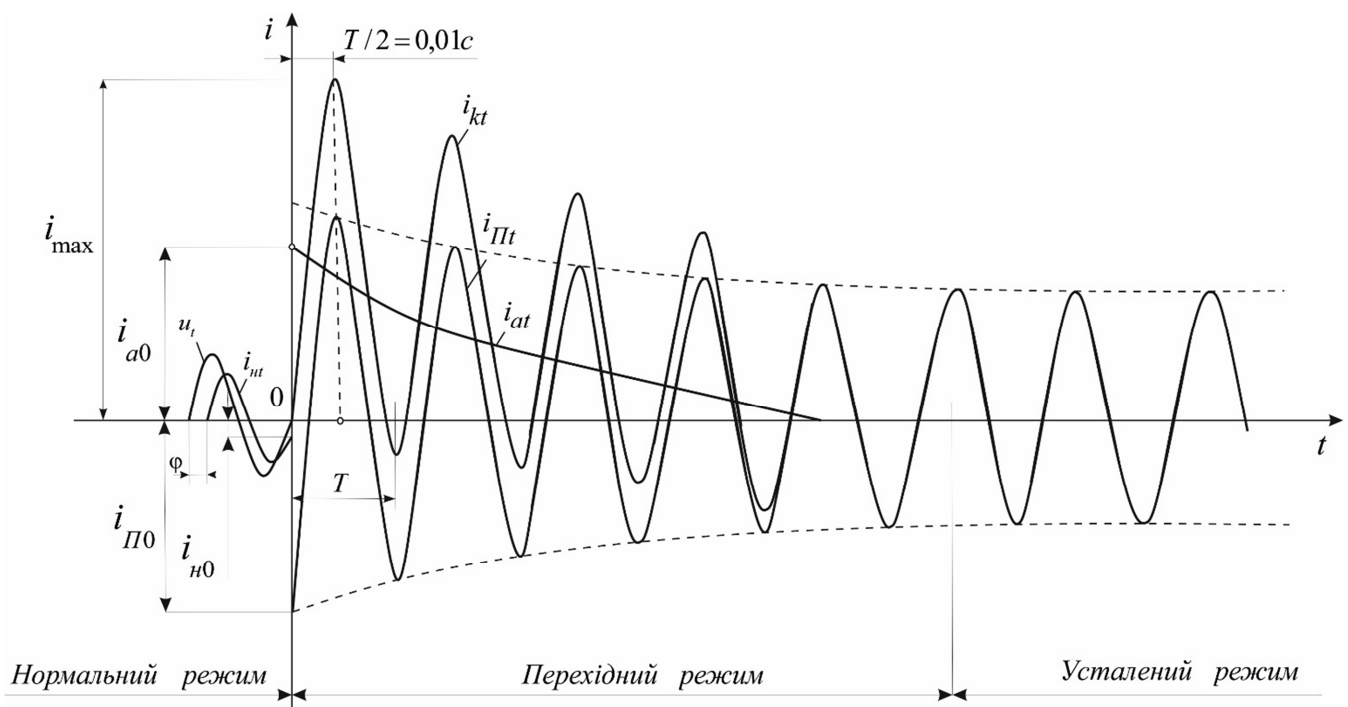


Рис.6.1. Зміни у часі струму фази та його складових для генератора без пристрою АРЗ при трифазному КЗ на затискачах

До початку КЗ генератор працює в нормальному режимі, при якому в колі навантаження протікає струм $i_{нв}$. У момент часу $t=0$, коли струм навантаження має значення $i_{нв0}$, виникло КЗ. У результаті – настав перехідний режим, який характеризується збільшенням значення струму.

Струм навантаження та періодичну складову струму КЗ у початковий момент часу можна визначити з векторної діаграми за виразами:

$$\left. \begin{aligned} i_{нв0} &= I_{нв,маx} \sin(\alpha - \varphi); \\ i_{П0} &= I_{П,маx} \sin(\alpha - \varphi_k). \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

При КЗ на затискачах генератора або поблизу розташованих від нього точках мережі результируючий опір кола КЗ – практично індуктивний.

До того ж кут φ_k близький до 90° та завжди більший φ . Оскільки генератор в даному випадку – джерело обмеженої потужності і працює без пристрою АРЗ, напруга на його затискачах, а, як наслідок, і періодична складова струму КЗ в перехідному режимі (порівняно з їх початковими значеннями) зменшуються. Це пояснюється тим, що у міру затухання вільних струмів, наведених у початковий момент часу, в обмотці збудження, демпферних обмотках та в масиві ротора потік реакції статора при незмінному струмі збудження послаблює результуючий магнітний потік у повітряному зазорі генератора.

Періодична складова струму КЗ, якщо напруга джерела в ході перехідного процесу не змінюється (джерело необмеженої потужності), залишається незмінною за амплітудою. На рис. 6.1. періодична складова струму КЗ під час перехідного режиму при відсутності пристрою АРЗ зображена синусоїдальною зі спадною амплітудою. Тривалість перехідного процесу при частоті струму $f = 50 \text{ Гц}$, наявності активних опорів короткозамкненого кола дорівнює $0,1 \dots 0,2 \text{ с}$ (середнє значення постійної затухання аперіодичної складової $T_a = 0,05 \text{ с}$, її згасання $t \approx 0,15 \text{ с}$).

Ураховуючи швидке затухання аперіодичної складової, повний струм КЗ для часу $t \geq 0,15 \text{ с}$ можна вважати практично рівним періодичній складовій. Після перебігу перехідного процесу настає усталений режим. Миттєве та діюче значення усталеного струму КЗ позначені відповідно через i_∞ і I_∞ . Початковий струм КЗ більший усталеного значення струму ($I_{п0} > I_\infty$).

Для підтримки на затискачах генератора напруги сталою або змінною в допустимих межах при зміні режимів роботи СЕП сучасні генератори обладнують пристроями АРЗ. Якщо КЗ виникає на затискачах генератора з пристроєм АРЗ, то дія АРЗ суттєво впливає на характер перехідного процесу струму. Залежності змін у часі струму та його складових при КЗ на затискачах генератора з АРЗ наведені на рис. 6.2.

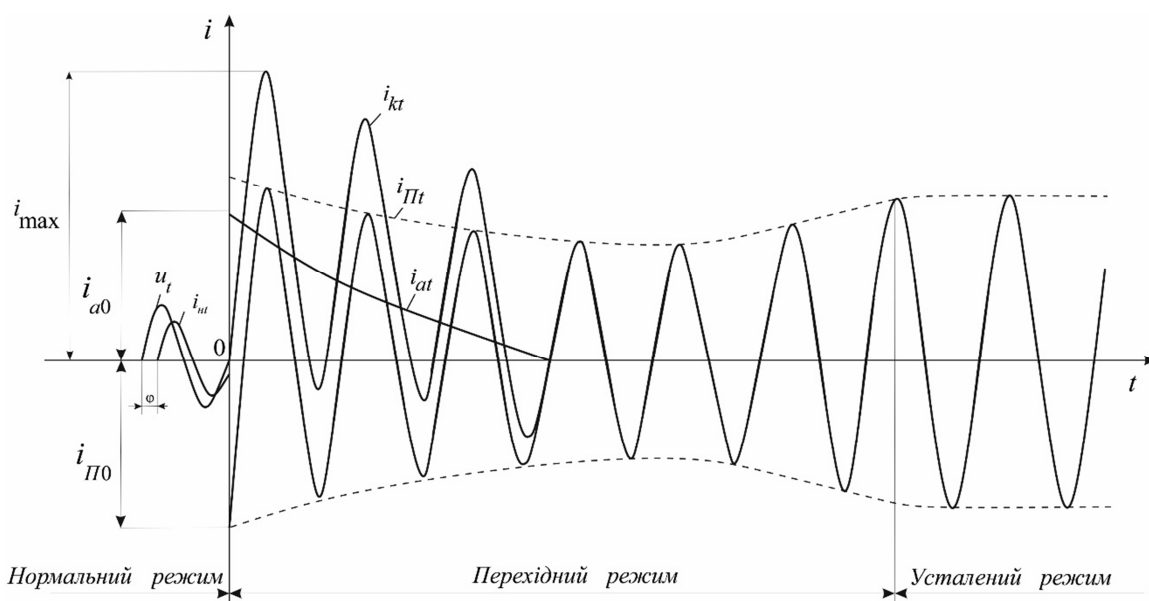


Рис. 6.2. Зміни у часі струму фази та його складових для генератора з АРЗ при трифазному КЗ на затискачах

У початковий момент часу виникнення КЗ з урахуванням інерції магнітних потоків, зчеплених з обмотками генератора, пристрій АРЗ на перехідний процес струму практично не впливає. З часом, однак, коли пристрій АРЗ діє, струм збудження і пов'язані з ним складові е.р.с. та струмів статора і демпферних обмоток збільшуються. Процес проходить досить повільно, оскільки в основному змінюються електрорушійна сила генератора та обумовлена нею періодична складова струму статора.

Як бачимо з рис. 6.2, при КЗ на затискачах генератора з пристроєм АРЗ на початку перехідного режиму струм змінюється так само, як і в генераторах без АРЗ. Цей інтервал часу визначається тривалістю зниження напруги до значення, при якому запускається пристрій АРЗ, та власним часом дії АРЗ. Після вступу в дію АРЗ напруга на затискачах генератора та періодична складова струму КЗ починає зростати і досягає встановлених значень, відповідних граничному струму збудження.

Оскільки дія АРЗ виявляється через кілька періодів від часу виникнення КЗ, початкові значення періодичної та аперіодичної складових, а також ударний струм КЗ у перехідному режимі будуть такими ж, як і *при відсутності АРЗ*. Таким чином, затухання вільних струмів в обмотці статора та обмотки збудження, що виникли при раптовому КЗ, якоюсь мірою компенсуються збільшенням струму КЗ за рахунок дії АРЗ. Залежно від співвідношення між значеннями цих струмів та характеру їх змін у часі обвідна крива струму КЗ має різну форму. При цьому аперіодична складова i_{at} зберігається практично такою ж, як і при відсутності пристрою АРЗ. Періодична складова i_{pt} залежно від співвідношення між початковим та усталеним значеннями струму КЗ при граничному струмі збудження може затухати, зростати або ж залишатися незмінною. Якщо під дією пристрою АРЗ напруга генератора сягає номінального або ж гранично допустимого значення, то струм КЗ у подальшому – сталий.

Коротке замикання у віддалених точках системи електропостачання

При виникненні КЗ у живильній чи розподільній мережі СЕП струми КЗ значно менші порівняно з тими, що з'являються при КЗ на затискачах генератора. Результируючий опір кола КЗ тут зростає, тому вплив збурення режиму у вигляді КЗ на роботу генератора протягом перехідного режиму зменшується. Скорочення тривалості перехідного процесу, яке залежить від електричної віддаленості точки КЗ, буде тим меншим, чим віддаленіша точка КЗ від джерела живлення. При КЗ в електрично віддалених точках системи електропостачання періодична складова у перехідному режимі практично не змінюється за амплітудою (рис.6.3).

У цьому разі зміну електрорушійної сили генератора не враховують і напругу на його затискачах вважають сталою та рівною номінальному значенню. Струм КЗ значно перевищує номінальний і для елементів системи електропостачання небезпечний.

Таким чином, при КЗ в електрично віддалених точках системи електропостачання беруть до уваги, що періодична складова струму не змінюється з початкового моменту часу виникнення КЗ і в точці КЗ має значення:

$$I_{п0} = I_{пт} = I_{\infty}. \quad (6.2)$$

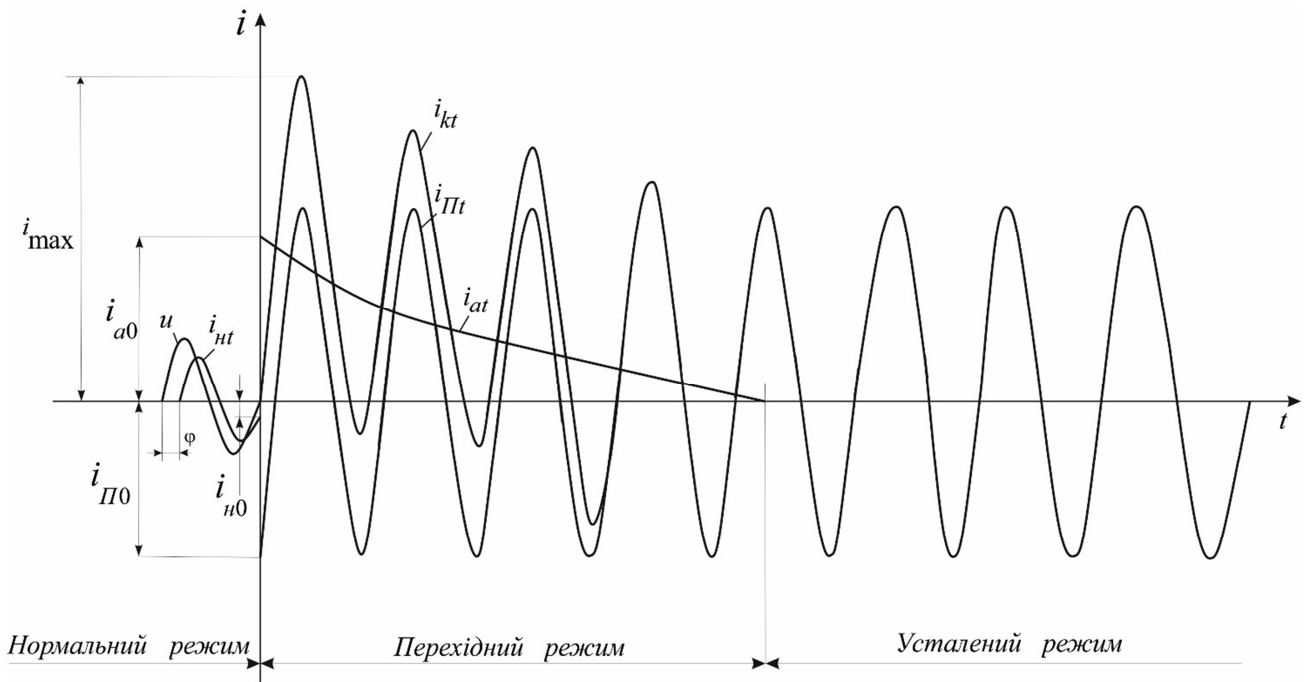


Рис. 6.3. Зміни у часі струму та його складових при КЗ у віддаленій точці системи електропостачання

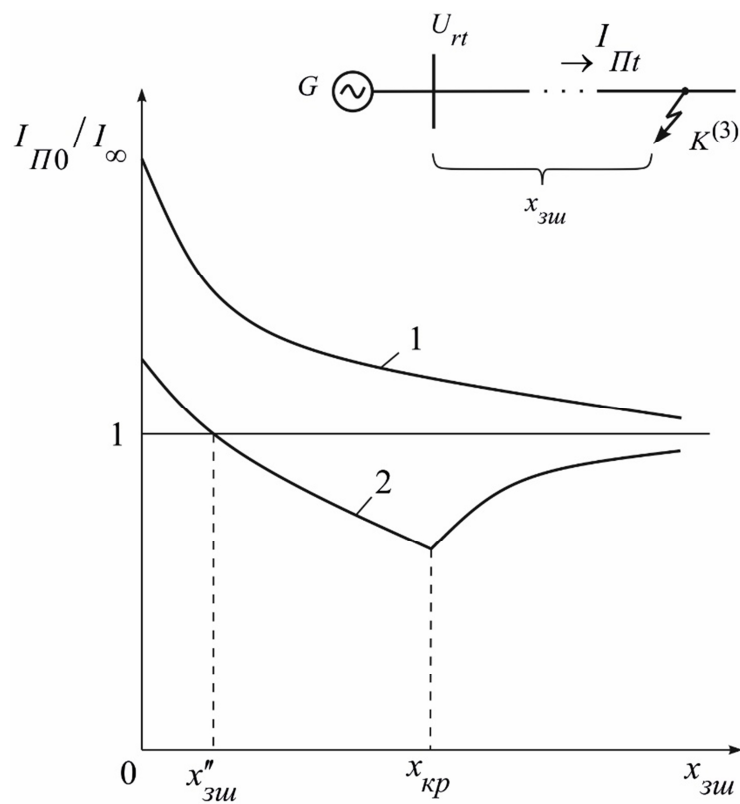


Рис. 6.4. Залежності відношення струмів $I_{\Pi 0} / I_{\infty}$ від електричної віддаленості місця КЗ та наявності пристрою АРЗ на генераторі: 1 – без АРЗ; 2 – з АРЗ

Аперіодична складова струму виникає при будь-якому віддаленні точки КЗ від джерела і затухає тим скоріше, чим *більше значення активної складової опору* короткозамкненого кола.

Значення зовнішнього опору кола ввімкнення генератора $x_{зи}$, за яким при КЗ початкове значення періодичної складової струму КЗ $I_{п(t=0)}$ та усталений струм I_{∞} однакові, можна знайти, враховуючи відповідні електрорушійну силу та опори, з рівняння:

$$E_q'' / (x_d'' + x_{зи}) = E_q / (x_d + x_{зи}), \quad (6.3)$$

де E_q'' і E_q – електрорушійна сила генератора в початковий момент часу виникнення КЗ в усталеному режимі.

Із залежності (6.3) маємо залежність:

$$x_{зи} = (E_q'' x_d - E_q x_d'') / (E_q - E_q''). \quad (6.4)$$

З побудованих залежностей відношення $I_{п0} / I_{\infty}$ від зовнішнього опору $x_{зи}$ (рис. 6.4), можна встановити, що з відсутністю регулювання напруги (крива 1) це відношення завжди більше одиниці і гранично спрямоване до неї. У випадках регулювання напруги за допомогою пристрою АРЗ генератора (крива 2) відношення $I_{п0} / I_{\infty}$ спочатку зменшується до мінімального значення (0,6...0,8), а потім зростає, також гранично наближаючись до одиниці.

Значення зовнішнього опору короткозамкненого кола генератора, коли відношення $I_{п0} / I_{\infty}$ в системі електропостачання з регулюванням напруги збільшується, називають критичним (позначають $x_{кр}$). Значення $x_{кр}$ залежить від параметрів синхронної машини та попереднього режиму роботи.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Трифазне КЗ на затискачах генератора – причина найбільш небезпечного аварійного режиму.
2. Результуючий опір, утворений короткозамкненим колом, стає при цьому рівним лише внутрішньому опорі генератора, а *перехідний процес* супроводжується максимальними змінами напруги та струму.
3. Процес викликає також появу аперіодичного струму, який накладається на періодичний струм від джерела живлення.
4. При КЗ на затискачах генератора або поблизу розташованих від нього точках мережі результуючий опір кола КЗ – практично індуктивний.
5. У джерела обмеженої потужності (генератор без пристрою АРЗ) напруга на його затискачах і періодична складова струму КЗ в перехідному режимі зменшуються.
6. Періодична складова струму КЗ, якщо напруга джерела в ході перехідного процесу не змінюється (*джерело необмеженої потужності*), залишається незмінною за амплітудою.
7. Тривалість перехідного процесу при частоті струму $f = 50$ Гц, наявності активних опорів короткозамкненого кола дорівнює 0,1...0,2 с.
8. Враховуючи швидке затухання аперіодичної складової, повний струм КЗ для часу $t \geq 0,15$ с можна вважати практично рівним періодичній складовій.

9. Для підтримки на затискачах генератора напруги сталою або змінною в допустимих межах при зміні режимів роботи СЕП сучасні генератори обладнують пристроями АРЗ.

10. У початковий момент часу виникнення КЗ з урахуванням інерції магнітних потоків, зчеплених з обмотками генератора, пристрій АРЗ на перехідний процес струму практично не впливає.

11. Коли пристрій АРЗ діє, струм збудження і пов'язані з ним складові е.р.с. та струмів статора і демпферних обмоток збільшуються. Процес проходить досить повільно, оскільки в основному змінюються електрорушійна сила генератора та обумовлена нею періодична складова струму статора.

12. Після вступу в дію АРЗ напруга на затискачах генератора та періодична складова струму КЗ починає зростати і досягає встановлених значень, відповідних граничному струму збудження.

13. Оскільки дія АРЗ виявляється через кілька періодів від часу виникнення КЗ, початкові значення періодичної та аперіодичної складових, а також ударний струм КЗ у перехідному режимі будуть такими ж, як і *при відсутності АРЗ*.

14. Періодична складова залежно від співвідношення між початковим та ustalеним значеннями струму КЗ при граничному струмі збудження може згаснути, зростати або ж залишатися незмінною.

15. Якщо під дією пристрою АРЗ напруга генератора досягає номінального або ж гранично допустимого значення, то струм КЗ у подальшому – сталий.

16. При виникненні КЗ у живильній чи розподільній мережі СЕП струми КЗ значно менші порівняно з тими, що з'являються при КЗ на затискачах генератора.

17. Скорочення тривалості перехідного процесу, яке залежить від електричної віддаленості точки КЗ, буде тим меншим, чим віддаленіша точка КЗ від джерела живлення.

18. При КЗ в електрично віддалених точках системи електропостачання періодична складова струму не змінюється з початкового моменту часу виникнення КЗ.

19. Аперіодична складова струму виникає при будь-якому віддаленні точки КЗ від джерела і згасає тим скоріше, чим більше значення активної складової опору короткозамкненого кола.

Тестові питання по темі 6

1. Пояснити фізику процесів короткого замикання на затискачах генератора (без АРЗ).
2. Пояснити фізику процесів короткого замикання на затискачах генератора (з АРЗ).
3. Як змінюється струм фази та його складові при коротких замиканнях?
4. Дати характеристику нормального перехідного, ustalеного режимів?
5. Які параметри характеризують можливі режими короткого замикання?
6. Чому змінюються параметри режимів при дії АРЗ?

7. Чому аперіодична складова струму виникає незалежно від точки короткого замикання?
8. Чому періодична складова струму короткого замикання з часом стає усталеним струмом?
9. Чому при коротких замиканнях у віддалених точках періодична складова струму не змінюється в часі?
10. Чому при коротких замиканнях на затискачах генератора періодична складова струму змінюється в часі?
11. Що означає критичне значення зовнішнього опору короткозамкненого кола генератора?

ТЕМА 7 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Початкове значення періодичної складової струму

Періодичну складову струму в початковий момент часу появи КЗ визначають за принципом збереження первинного результуючого потокозчеплення ротора при раптовому порушенні режиму роботи генератора. Оскільки в момент часу виникнення раптового КЗ потокозчеплення ротора залишається незмінним, наведена в статорі електрорушійна сила на початку перехідного процесу також не змінюється.

Якщо позначити індексами "(0)" і "0" відповідно показники попереднього режиму та для початкового моменту часу появи КЗ, з векторних діаграм неявно- та явнополюсних синхронних машин у попередньому режимі, однак впливає, що значення перехідної електрорушійної сили $E'_{q(0)}$ і надперехідної електрорушійної сили $E''_{q(0)}$, з достатньою для практичних розрахунків точністю можна визначити для машин:

без демпферних контурів

$$E'_{q(0)} \approx E'_{(0)} \approx U_{(0)} + I_{(0)} x'_d \sin \varphi_{(0)}; \quad (7.1)$$

з демпферними контурами

$$E''_{q(0)} \approx E''_{(0)} \approx U_{(0)} + I_{(0)} x''_d \sin \varphi_{(0)}. \quad (7.1)$$

Середні значення x'_d, x''_d та $E'_{q(0)}, E''_{q(0)}$ у відносних одиницях виміру для машин потужністю до 100 МВт при номінальному навантаженні та $\cos \varphi = 0,8$ до початку перехідного процесу відповідно складають:

турбогенератора – 0,2; 0,13 та 1,12; 1,078;

гідрогенератора – 0,35; 0,25 та 1,15; 1,21.

Оскільки перехідна та надперехідна е.р.с. близькі до одиниці, й інженерних розрахунках при будь-яких значеннях навантаження, що передують КЗ, часто беруть $E'_{*q(0)} = 1, E''_{*q(0)} = 1$.

Початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначають за результуючим опором короткозамкненого кола мережі в іменованих x_{pez} або відносних $x_{*(\delta)pez}$ одиницях виміру та перехідної електрорушійної сили $E'_{(0)}$ з відсутністю у машині демпферних контурів чи надперехідної електрорушійної сили $E''_{(0)}$ з їх наявністю.

Якщо короткозамкнене коло мережі живиться від кількох джерел з визначеною еквівалентною е.р.с. E''_{Σ} , а результуючий опір виражено в іменованих одиницях виміру, то початкове значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{I0}^{(3)} = E''_{\Sigma} / (\sqrt{3} x_{pez}). \quad (7.2)$$

Якщо електрорушійна сила та опір брати у відносних одиницях виміру, то маємо:

$$I_{I0}^{(3)} = E''_{*\Sigma} I_{\delta} / x_{*(\delta)pez}, \quad (7.3)$$

де I_0 – базисний струм, який відповідає ступеню напруги, де визначається струм КЗ.

В інженерних розрахунках струму КЗ можна скористатися також середніми значеннями показників елементів системи електропостачання (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Середні відносні значення x_{*d}'' і E_*'' елементів СЕП при нормальних умовах експлуатації

Елемент СЕП	x_{*d}''	E_*''
Турбогенератор потужністю до 100 МВт	0,125	1,08
Те ж, потужністю 100-500 МВт	0,2	1,13
Гідрогенератор з демпферними обмотками	0,2	1,13
Те ж, без демпферних обмоток	0,27	1,18
Синхронний компенсатор	0,2	1,2
Синхронний двигун	0,2	1,1
Асинхронний двигун	0,2	0,9
Узагальнене навантаження	0,35	0,85

При відомому попередньому режимі системи електропостачання для визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ доцільним буде принцип накладання. Відповідно до останнього шуканий струм знаходять шляхом накладання власне аварійного струму на *струм попереднього режиму*. Дійсний струм отримують як результат накладання низки умовних струмів, кожен з яких відповідає дії однієї або ж кількох електрорушійних сил при ввімкнених інших елементах схеми.

Із значною кількістю електрорушійних сил у схемі системи електропостачання визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ спрощується, якщо скористатися теоремою *про активний двополюсник*. Відповідно до теореми струм в точці КЗ можна знайти як суму попереднього струму $I_{(0)}$ у вітках схеми та аварійної складової струму $I_{ав}$ від дії е.р.с., яка дорівнює значенню напруги $U_{к(0)}$, прикладеної в цій точці в попередньому режимі.

Аварійна складова струму при зазначеній умові:

$$I_{ав} = -U_{к(0)} / x_{ex,к}, \quad (7.4)$$

де $x_{ex,к}$ – вхідний опір схеми з боку КЗ, обчислений за умови, що всі електрорушійні сили у схемі дорівнюють нулю.

Струм та напруга, що розглядаються в j -й вітці схеми при КЗ у точці K , визначаються виразами (залежність 7.5):

$$I_j = I_{jk} + I_{j(0)}; \quad (7.5)$$

$$U_j = U_{jk} + U_{j(0)},$$

де $I_{jk} = I_k c_{jk}$; c_{jk} — коефіцієнт розподілу струму для j -ї вітки схеми при КЗ у точці K .

Вплив навантаження мережі на початкове значення періодичної складової струму КЗ залежить від значення залишкової напруги в точці його ввімкнення. Чим далі джерело живлення системи електропостачання від точки КЗ та чим ближче місце ввімкнення навантаження до цієї точки, тим більший вплив навантаження на збільшення струму КЗ. Звичайно, при визначенні струму КЗ ураховують лише ті навантаження чи окремі електродвигуни, які безпосередньо приєднані до точки КЗ або ж перебувають на невеликій електричній відстані від неї.

При КЗ у мережі після малопотужних трансформаторів, реакторів, довгих кабельних ліній (дають значну електричну віддаленість) на результуючий опір кола КЗ впливає, в основному, опір таких елементів. Можна вважати, що за цих умов живлення точки КЗ здійснюється від джерела необмеженої потужності ($S_{GS} = \infty$; $x''_{GS} \approx 0$; $E''_{GS} = U_{*GS} = I = const$). Періодична складова струму КЗ – незатухаюча ($I_{K0} = I_{Pt}$) і в подібних випадках визначається:

$$I_{K0}^{(3)} = I_{\sigma} / x_{*(\sigma)рез} \quad (7.6)$$

Аналогічно знаходять потужність КЗ:

$$S_{K0}^{(3)} = S_{\sigma} / x_{*(\sigma)рез} \quad (7.7)$$

Значення струму та потужності, отримані за (7.6) та (7.7), будуть дещо завищеними порівняно з дійсними значеннями, оскільки реально $x''_{GS} > 0$.

Періодична складова струму в довільний момент часу

Зміна струму КЗ обумовлена розмагнічувальною дією реакції статора синхронного генератора, затуханням вільних складових струму та дією пристрою АРЗ. Діюче значення періодичної складової струму основної гармоніки частоти:

$$I_{Pt} = \sqrt{I_{d,Pt}^2 + I_{q,Pt}^2} \quad (7.8)$$

У разі виникнення КЗ на затискачах генератора та зв'язаного з ним збільшення струму збудження періодичні складові струму обмотки статора синхронної машини за осями d та q у довільний момент часу можна знайти з відповідних залежностей (див. підручник).

Повний струм у довільний момент часу містить періодичну і аперіодичну складові та складову подвійної частоти (обумовлена несиметрією ротора та наявністю аперіодичної складової струму статора).

Точний розрахунок струмів КЗ у довільний момент часу в складних схемах СЕП, що, крім джерел живлення, містять потужні навантаження, *утруднений*. Тому при відсутності потреби у високій точності розрахунків для обчислення струмів КЗ у довільний момент часу користуються наближеними методами розрахунку.

Струм в усталеному аварійному режимі

В усталеному аварійному режимі всі вільні струми, що з'явилися в момент часу КЗ, у синхронній машині затухають і зміна напруги на її затискачах під дією пристрою АРЗ припиняється.

Параметри короткозамкненого кола мережі в усталеному режимі можна визначити на основі характеристик неробочого режиму і короткого замикання синхронної машини, її синхронних опорів у поздовжній та поперечній осях, опору розсіювання статора та граничного струму збудження $I_{f,sp}$.

Синхронний опір у поздовжній осі визначається:

$$x_{*d} = c / k_c, \quad (7.9)$$

де c – відносне значення електрорушійної сили за ненасиченою характеристикою холостого ходу при $I_{*f} = 1$; k_c – відношення короткого замикання (відносний усталений струм при трифазному КЗ на затискачах генератора до відносного струму збудження, рівного одиниці). У неявнополюсних машин $x_d \approx x_q$, а в явнополюсних – $x_q \approx 0,6x_d$. При цьому $c = 1,05 \dots 1,2$.

Для спрощення розрахунків струмів КЗ криволінійну характеристику холостого ходу $E_q = f(I_f)$ спрямляють у точці з координатами $E_{*q} = 1$; $I_{*f} = 1$. Тоді (залежність 7.10)

$$\begin{aligned} x_{*d} &= 1 / k_c; \\ E_{*q} &= I_{*f}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Як свідчать практичні розрахунки струмів КЗ, різниця між струмами явно- та неявнополюсних синхронних машин незначна, а їхні приблизні значення можна визначити за формулою:

$$I = E_q / \sqrt{(x_d + x_{3ш})^2 + r_{3ш}^2}. \quad (7.11)$$

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Періодичну складову струму в початковий момент часу появи КЗ визначають за принципом збереження первинного результуючого потокозчеплення ротора при раптовому порушенні режиму роботи генератора.

2. Початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначають за результуючим опором короткозамкненого кола мережі в іменованих або відносних одиницях виміру та перехідної електрорушійної сили з відсутністю у машині демпферних контурів чи надперехідної електрорушійної сили з їх наявністю.

3. В інженерних розрахунках струму КЗ можна скористатися середніми значеннями показників елементів системи електропостачання.

4. При відомому попередньому режимі системи електропостачання для визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ доцільним буде принцип накладання.

5. Вплив навантаження мережі на початкове значення періодичної складової струму КЗ залежить від значення залишкової напруги в точці його ввімкнення.

6. Чим далі джерело живлення системи електропостачання від точки КЗ та чим ближче місце ввімкнення навантаження до цієї точки, тим більший вплив навантаження на збільшення струму КЗ.

7. При визначенні струму КЗ ураховують лише ті навантаження чи окремі електродвигуни, які безпосередньо приєднані до точки КЗ або ж перебувають на невеликій електричній відстані від неї.

8. При КЗ у мережі після малопотужних трансформаторів, реакторів, довгих кабельних ліній на результуючий опір кола КЗ впливає, в основному, опір таких елементів.

9. За цих умов живлення точки КЗ здійснюється від джерела необмеженої потужності.

10. Зміна струму КЗ обумовлена розмагнічувальною дією реакції статора синхронного генератора, затуханням вільних складових струму та дією пристрою АРЗ.

11. Повний струм у довільний момент часу містить періодичну і аперіодичну складові та складову подвійної частоти.

12. Точний розрахунок струмів КЗ у довільний момент часу в складних схемах СЕП, що, крім джерел живлення, містять потужні навантаження, *утруднений*.

13. При відсутності потреби у високій точності розрахунків для обчислення струмів КЗ у довільний момент часу користуються наближеними методами розрахунку.

14. В усталеному аварійному режимі всі вільні струми, що з'явилися в момент часу КЗ, у синхронній машині затухають і зміна напруги на її затискачах під дією пристрою АРЗ припиняється.

Тестові питання по темі 7

1. Які умови визначення періодичної складової струму трифазного короткого замикання в початковий момент часу?
2. Як розраховуються перехідна $E'_{q(0)}$ та надперехідна $E''_{q(0)}$ електрорушійні сили?
3. Як розраховують початкове значення періодичної складової струму (потужності) трифазного короткого замикання?
4. Чим обумовлена зміна струму короткого замикання генератора?
5. Як розраховують діюче значення періодичної складової струму (основна гармоніка) короткого замикання?
6. Як розраховують струм в усталеному аварійному режимі?

ТЕМА 8

РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ (ГЕНЕРАТОРИ)

Основні положення

При складанні розрахункової схеми систем 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 (двигуни).

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. $E_i = const$ з внутрішнім опором x'_d або x'_d , а пасивні (трансформатори, ЛЕП, реактори) – лише електричними опорами;
- для часу $t>0$ у еквівалентів активних елементів $E_i = var$ та $x_i = var$, а пасивних елементів $x_i = const$ (не враховуємо зміну значення частоти в аварійному режимі) і $r_i = var$ (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 необхідних 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 в місці КЗ обчислюється для вибору електроустаткування, *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, у початковий та довільний моменти часу перебігу аварійного режиму. Методика передбачає обчислення струмів КЗ для вирішення завдань: вибір та перевірка електроустаткування за умов короткого замикання; вибір запобіжних уставок та оцінка можливої дії засобів релейного 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 електроустаткування 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.

Загальні рекомендації щодо розрахунку струмів КЗ *частково викладені у темі 7.*

Рекомендована стандартом методика *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 електромагнітних 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 далеко. 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:

$$x_{GS} = U_{cp, ном} / (\sqrt{3}I_K^{(3)}) = U_{cp, ном}^2 / S_K, \quad (8.1)$$

де $U_{cp, ном}$ – 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.

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. 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.

Завдання розрахунків

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.

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:

$$I_{II,0}^{(3)} = U_{cp, ном} / (\sqrt{3} \cdot z_{рез}). \quad (8.2)$$

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

миттєвого значення

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{II,0}^{(3)}; \quad (8.3)$$

діючого значення

$$I_y = I_{II,0}^{(3)} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (8.4)$$

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

$$k_y = 1 + \exp(-0,01/0,05) = 1,8, \quad (8.5)$$

а значення ударного струму:

$$\begin{aligned} i_y^{(3)} &= 2,55 I_{II,0}^{(3)}; \\ I_y^{(3)} &= 1,52 I_{II,0}^{(3)}. \end{aligned} \quad (8.6)$$

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:

$$T_a = x_{pez} / (\omega r_{pez}) \quad (8.7)$$

та обчислювати нове значення k_y .

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

Діаграми періодичної складової струму у 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. Ці діаграми 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 напрямів спрощених методів розрахунку значень показників перехідних процесів у СЕП, ініційованих трифазними короткими замиканнями.

Для інженерних 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 залежність 8.8 (рис. 8.1):

$$\gamma_{t,\Gamma} = f_1(t, I_{*(ном)II,0,\Gamma}^*), \quad (8.8)$$

а також додаткові залежності 8.9 (рис. 8.2):

$$\gamma_{t,\Gamma} = f_2(\gamma_{t\Sigma}, C_\Gamma), \quad (8.9)$$

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

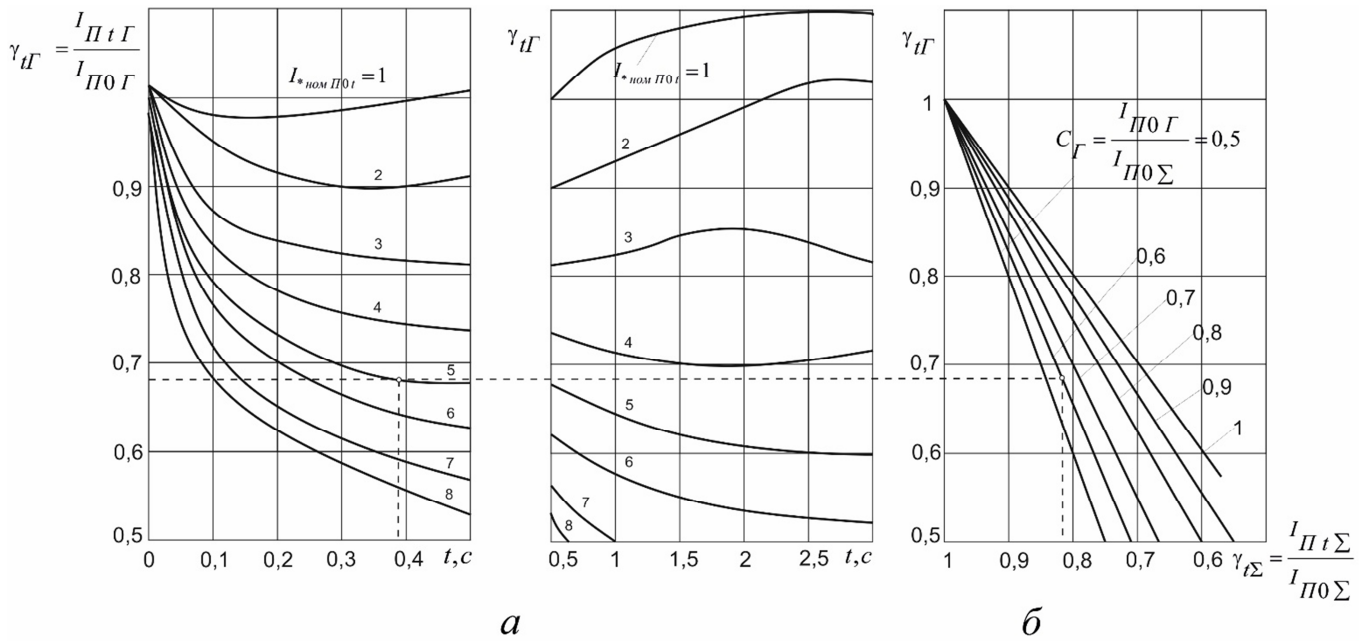


Рис. 8.1. Зміни у часі періодичної складової струму КЗ (синхронний генератор і компенсатор з тиристорною системою збудження)

До залежностей (8.8) увійшли *параметри режиму синхронного генератора (еквівалентного джерела)*: $I_{П, t, \Gamma}$, $I_{П, 0, \Gamma}$ – діючі значення *періодичної складової* струму КЗ в генеруючій вітці у довільні моменти часу t і *початкове значення* цієї складової відповідно; $I_{ном, \Gamma}$ – значення номінального струму синхронного генератора, зведене до ступеня напруги у місці КЗ.

Графічними залежностями (8.9) 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 $I_{П, t, \Gamma}$, $I_{П, 0, \Gamma}$ з параметрами режиму у місці КЗ ($I_{П, 0, \Sigma}$, $I_{П, t, \Sigma}$ – 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. 8.2, а,б – 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 $I_{*(ном)П, 0, \Gamma} > 3$; з рис. 8.2, а,б – слід використовувати для розрахунку діючого значення *періодичної складової* струму КЗ від

синхронних генераторів з тиристорною системою самозбудження з послідовними трансформаторами і без них відповідно; з рис. 8.3 – від синхронних генераторів з діодною безщітковою системою збудження.

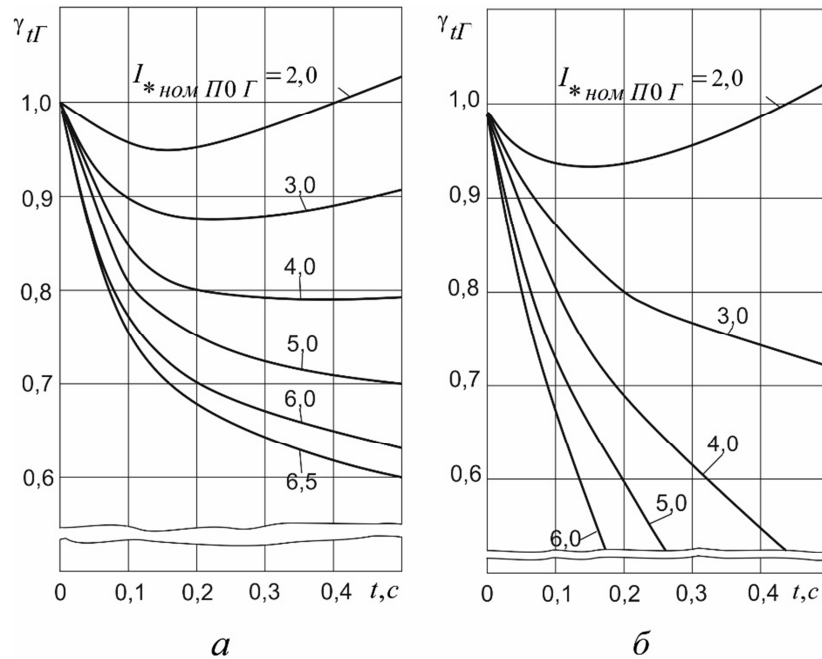


Рис. 8.2. Зміна у часі періодичної складової струму КЗ (синхронний генератор і компенсатор з тиристорною системою самозбудження: а – з послідовними трансформаторами; б – без послідовних трансформаторів)

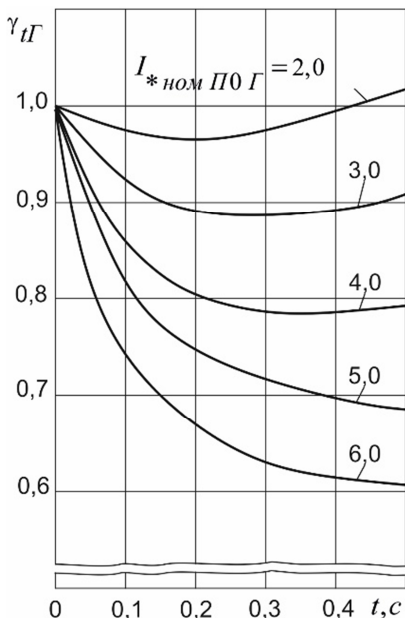


Рис. 8.3. Зміна у часі періодичної складової струму КЗ (синхронні генератори з діодною безщітковою системою збудження)

Коротке замикання вважається електрично віддаленим, якщо відношення діючого значення періодичної складової струму синхронного генератора у початковий момент КЗ до його номінального струму $\gamma_{t,\Gamma} < 2$; 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:

$$\gamma_{t, \Gamma} = f_l(t, I_{*(ном)П, 0, \Gamma}), \quad (8.10)$$

що відповідає значенню електричної віддаленості $I_{*(ном)П, 0, \Gamma}$, для заданого моменту часу t_i отримують відношення струмів:

$$(I_{П, t, \Gamma} / I_{П, 0, \Gamma})_{t_i} = \gamma_{t_i, \Gamma}; \quad (8.11)$$

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

$$I_{П, t_i, \Gamma} = \gamma_{t_i, \Gamma} \cdot I_{П, 0, \Gamma}. \quad (8.12)$$

Визначення періодичної складової струму КЗ з використанням типових кривих урахує параметри та характеристики генераторів джерела живлення (потужність, тип системи збудження, розрахунковий час КЗ), віддаленість місця КЗ, структуру системи зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства.

Діаграма періодичної складової струму (кілька джерел)

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 ($I_{*(ном)П, 0, Г} < 2$ або $x_{*(ном)роз} > 3$), то створювану еквівалентним генератором періодичну складову струму обраховують за формулою (8.2); 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.

Коли характеристики джерел такі, що для визначення періодичних складових струму КЗ можна скористатися розрахунковими кривими, то попередньо схему заміщення СЕП перетворюють на умовно радіальну, де кожна вітка відповідає виділеному джерелу (групі однотипних джерел) і через опір сполучена з точкою КЗ. Це перетворення схеми заміщення роблять за допомогою коефіцієнтів струморозподілу (див. підрозд. 1.6).

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. 8.4):

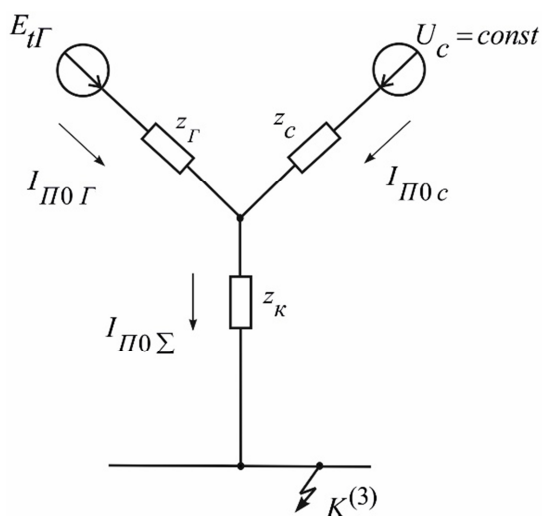


Рис. 8.4. Еквівалентна схема заміщення СЕП

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

$$I_{Π, 0, Σ} = E_{*(б), 0, Σ} \cdot I_{б} / Z_{*(б)рез}; \quad (8.13)$$

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

$$I_{Π, 0, Г} = [E_{*(б), 0, Σ} \cdot I_{б} - I_{Π, 0, Σ} \cdot Z_{*(б)к}] / Z_{*(б)Г}; \quad (8.14)$$

3) визначають відношення (8.8) $I_{\Pi,0,\Gamma} / I_{ном,\Gamma}$ та $I_{\Pi,0,\Gamma} / I_{\Pi,0,\Sigma}$ (коли (8.9) $C_{\Gamma} = I_{\Pi,t=0,\Gamma} / I_{\Pi,t=0,\Sigma} < 0,5$, 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 $\gamma_{t,\Gamma} = f_2(\gamma_{t\Sigma}, C_{\Gamma})$ при відомому значенні $I_{*(ном)\Pi,0,\Gamma}$ для розрахункового моменту часу t_i знаходять відношення $\gamma_{t,\Gamma}$, а далі відповідно до значення C_{Γ} встановлюють $\gamma_{t\Sigma}$;

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

$$I_{\Pi,t_i,\Sigma} = \gamma_{t_i,\Sigma} \cdot I_{\Pi,0,\Sigma}. \quad (8.15)$$

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

$$I_{\Pi,t(1,\dots,N)} = I_{\Pi,t,1} + I_{\Pi,t,2} + \dots + I_{\Pi,t,N}. \quad (8.16)$$

Виділяти багато генеруючих віток у схемі заміщення СЕП недоцільно. Схему заміщення 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*.

Методи розрахунку

Розрахунок періодичної складової струму для довільного моменту часу з використанням методу спрямлених характеристик детально можна вивчити, використовуючи підручник (розділ 5).

Метод спрямлених характеристик створено для обчислення в довільні моменти часу при спрощеному обліку зміни у часі е.р.с. \dot{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.

Розрахунок струму короткого замикання за **принципом накладання** розглянуто у нашому підручнику.

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 $\pm U_{\kappa}^{(n)}$, що дорівнюють напрузі попереднього режиму в цій точці.

Електрорушійна сила генератора у поєднанні з напругою $+U_{\kappa}^{(H)}$ у точці КЗ забезпечує умови попереднього навантажувального режиму. Прикладена у точці КЗ напруга $-U_{\kappa}^{(H)} = U_{ав}$ реалізує умови аварійного режиму.

Струм у будь-якій вітці схеми при КЗ слід знаходити як (залежність 8.17)

$$\dot{I}_{\kappa} = \dot{I}_{(0)} + \dot{I}_{ав} , \quad (8.17)$$

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

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. 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.

2. Перетворення схем заміщення та обчислення параметрів аварійного режиму відбувається з урахуванням електромагнітної (розмагнічувальної) реакції джерел на виникнення КЗ.

3. Спрощення розрахунку (для простоти обчислень, очевидної порівнянності та контролю результатів розрахунку з фізичною картиною явища) базується на певних припущеннях.

4. Останні беруться для конкретних умов відповідно до поставленого завдання та кінцевої мети розрахунку.

5. Обчислювальні показники перехідного процесу внаслідок КЗ, допустима похибка обчислень та вибір способу розрахунку залежать від кінцевої мети розрахунків.

6. Для вибору та перевірки електроустаткування струми КЗ можна розраховувати спрощеними способами, якщо їх похибка не перевищує 5...10 %.

7. Для трифазних електричних мереж СЕП напругою до 1 кВ промислової частоти.

8. 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.*

9. 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.

10. Для вибору заземлювальних пристроїв електроустановок обчислюють струм однофазного КЗ.

11. 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).

12. У наближених розрахунках аналітично прийнято визначати лише діюче значення періодичної складової струму КЗ за перший період та ударний струм КЗ.

13. Під час обчислення струмів КЗ у віддалених точках електричної мережі, в яких щодо впливу на значення струму помітно позначається активна складова опору короткозамкненого кола, рекомендується визначати значення сталої часу затухання аперіодичної складової.

14. При трифазному КЗ у мережі періодичну складову струму синхронного генератора для довільних моментів часу перебігу аварійного режиму можна розраховувати графоаналітичним способом за спеціальними діаграмами.

15. Для інженерних розрахунків використовуються універсальні типові криві.

16. При обчисленні струму в місці КЗ у СЕП з кількома джерелами живлення слід оцінювати можливість зменшення у схемі заміщення їх кількості.

17. 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.

18. Зміст розрахунку за загальною зміною *полягає в заміні груп* однотипних та однаково електрично віддалених синхронних генераторів еквівалентним.

19. 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.

20. Періодичні складові струму КЗ окремих генераторів або електростанцій змінюються у часі неоднаково.

Тестові питання по темі 8

1. Які основні принципи розрахунку перехідних процесів (при трифазних коротких замиканнях)?
2. Особливості розрахунків КЗ в електричних мережах напругою понад 1 кВ.
3. Особливості розрахунків КЗ в електричних мережах напругою до 1 кВ.
4. Які цільові завдання розрахунків перехідних процесів?
5. Як визначається ударний струм?
6. Суть використання типових кривих генератора.
7. Як розраховується електрично видалена точка короткого замикання?
8. Порядок розрахунку періодичної складової струму при використанні типових кривих.
9. Як використовують типові криві у випадку кількох джерел живлення?
10. Суть розрахунку за загальною зміною параметрів.
11. Основні принципи розрахунку методів спрямлених характеристик.
12. Основні принципи розрахунку методом накладання.

ТЕМА 9

РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ (ВУЗОЛ НАВАНТАЖЕННЯ)

Загальні положення

Розраховуючи струми КЗ, слід зважати на можливе підживлення місця КЗ від тимчасових джерел у вузлах. Накопичення в них енергії та їх спроможність як джерел залежать від типу й складу навантаження окремих вузлів системи електропостачання. Загалом *навантаження* за складом – комплексне і в ньому можна виділити основні типи: асинхронні та синхронні двигуни, тягові агрегати на постійному чи змінному струмі, статичні електроспоживачі (печі, освітлення, зварювальні агрегати, перетворювальні установки тощо), компенсуючі та симетруючі пристрої. Точне визначення впливу на значення струму КЗ сумарного навантаження сукупності електроспоживачів у СЕП різного складу, режимів роботи та схем живлення – нелегке завдання.

У зв'язку з викладеним в інженерних розрахунках обмежуються наближеним обліком підживлення місця КЗ від вузлів промислового навантаження.

У системі зовнішнього електропостачання (живильні мережі напругою понад 35 кВ) вузол навантаження здебільшого електрично віддалений від місця КЗ і його облік – лиш додатково уточнювальний чинник, який подають у вигляді узагальненого навантаження з параметрами:

для обліку підживлювального ефекту при $t = 0$:

$$E_{*(ном)0,нв} = 0,85; \quad x_{*(ном)0,нв} = 0,35; \quad (9.1)$$

у схемах заміщення:

$$\underline{Z}_{нв} = \frac{U_{нв}^2}{S_{нв}} (\cos \varphi_{нв} + j \cdot \sin \varphi_{нв}), \quad (9.2)$$

де $U_{нв}$ – напруга у вузлі, куди ввімкнене узагальнене навантаження; $S_{нв}$, $\varphi_{нв}$ – потужність та кут навантаження відповідно.

При КЗ у системах внутрішнього електропостачання (розподільні мережі напругою 10 кВ і нижче) слід виділяти окремо й враховувати вузлові тимчасові джерела у підживленні місця КЗ: двигуни, компенсуювальні установки реактивної потужності.

Розрахункові умови

Місце КЗ у СЕП може житися від електродвигунів, що містяться поблизу та внаслідок КЗ перейшли на генераторний режим і продовжують за інерцією обертатися за рахунок накопиченої у робочих машинах агрегатів кінетичної енергії. За час перехідного процесу значення струму змінюються у бік зменшення: від синхронного двигуна – до сталого (визначається струмом збудження), а від асинхронного – до нуля. Через перехід потужних двигунів на генераторний режим збільшення значення струму в місці КЗ може бути досить суттєвим, якщо вони безпосередньо ввімкнені до місця КЗ. Це – характерне для мереж та електроустановок напругою 6...10 кВ з двигунами потужністю 1000 кВ·А та більше. Насамперед, слід ураховувати двигуни, зв'язані з місцем КЗ безпосередньо або через ЛЕП, струмоводи, лінійні реактори чи

двообмотковий трансформатор, що мають порівняно невеликий електричний опір. Із знаком питання перехід на генераторний режим і врахування двигунів, увімкнених до здорових секцій багатосекційного розподільного улаштування підстанції та сполучених із секцією, де сталося КЗ, – через розщеплену обмотку трансформатора або плече зведеного реактора.

Критерій переходу двигуна на генераторний режим – умова:

$$U_{ост} < E_{0в}, \quad (9.3)$$

де $U_{ост}$ – значення залишкової напруги у точці ввімкнення двигуна (для розрахункової схеми КЗ у СЕП без урахування підживлення від двигуна); $E_{0в}$ – е.р.с. двигуна.

За значеннями залишкових напруг у вузлах СЕП можна виділити зону, в якій двигуни переходять на генераторний режим, чим уточнюється розрахункова схема СЕП за числом підживлювальних місць КЗ джерел.

Струм від двигунів ураховують для перевірки апаратів розподільних улаштувань 6...10 кВ та провідників за умов роботи при КЗ, а також для розрахунку та регулювання релейного захисту установок внутрішнього і зовнішнього електропостачання. Для цього визначають початкове значення періодичної складової струму від електродвигуна $I_{п,0,0в}$, ударний струм $i_{у,0в}$, а також періодичну $I_{п,t,0в}$ та аперіодичну $I_{а,t,0в}$ складові струму у довільний момент часу t перехідного процесу чи в момент τ вимкнення КЗ.

При обчисленнях у відносних одиницях виміру за базисні величини беруть номінальні напруги та потужність електродвигунів.

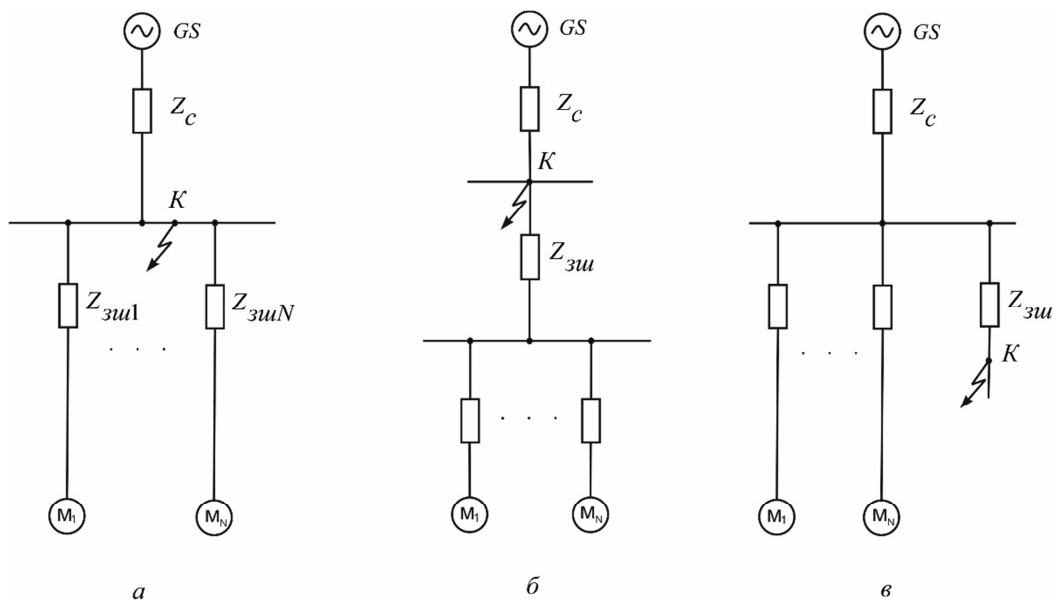


Рис. 9.1. Розрахункові схеми з двигунами: а – радіальна; б – складна із загальним опором для двигунів; в – складна із загальним опором для всіх джерел

Зміст розрахунку струму КЗ від двигунів генераторного режиму, залежить від схем ввімкнення до СЕП. Схему заміщення вузла можна перетворити на:

1) радіальну, де кожен двигун сполучений з точкою КЗ через індивідуальний опір (рис. 9.1, а);

2) складну, в якій точка КЗ міститься за спільним опором для групи різнотипних двигунів та електричної системи (рис. 9.1, б,в).

Увімкнені за радіальною схемою різнотипні двигуни слід розглядати індивідуально, складна схема увімкнення повинна бути перетворена відносно точки КЗ на еквівалентну з визначенням її результуючих параметрів.

Підживлення місця короткого замикання від асинхронних двигунів. Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням зовнішнього опору, через який увімкнено двигун, обчислюють за виразом:

$$I_{П,0,АД} = E_{*(ном)0} I_{ном,АД} / \sqrt{(x''_{*(ном)АД} + x_{*(ном)зи})^2 + r_{*(ном)зи}^2}, \quad (9.4)$$

де $E_{*(ном)t=0}$ – надперехідна е.р.с. двигуна; $x''_{*(ном)АД}$ – надперехідний опір двигуна.

З відсутністю початкових даних наближено вважають, що $E_{*(ном)0} = 0,9$. Облік значень зовнішнього опору здійснюють спрощено. Повний зовнішній опір можна не враховувати при співвідношенні $z_{*(ном)зи} < (0,1...0,2) \cdot x''_{*(ном)АД}$ (опір кабелів завдовжки до 200...300 м та перерізом не менше 50...70 мм²). Тоді:

$$I_{П,0,АД} = k I_{*(ном)пуск} I_{ном,АД}, \quad (9.5)$$

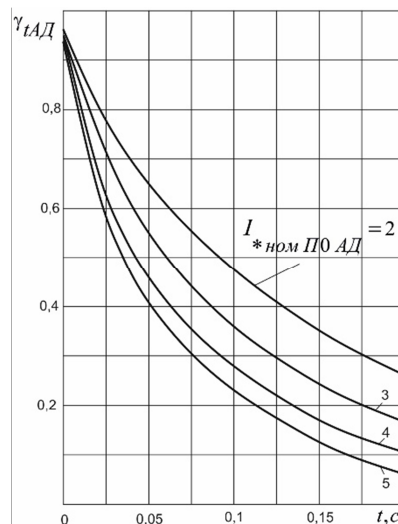
де $k = 1,2$ – для двигунів спеціального виконання; $k = 1$ – для інших асинхронних двигунів. Якщо зовнішній опір відповідає співвідношенню:

$$z_{*(ном)зи} > 0,2 x''_{*(ном)АД}, \quad (9.6)$$

то його необхідно брати до уваги при розрахунку:

$$I_{П,0,АД} = k I_{*(ном)пуск} I_{ном,АД} / (1 + z_{*(ном)зи} / x''_{*(ном)АД}). \quad (9.7)$$

Рис. 9.2. Зміна у часі періодичної складової струму КЗ (асинхронні двигуни)



Діюче значення періодичної складової струму КЗ у довільний момент часу для асинхронних двигунів при радіальній схемі увімкнення можна обчислити за спрощеним методом, використавши типові криві для електродвигунів (рис. 9.2). Такі залежності характеризують: зміну цієї складової струму у часі (до 0,2 с) за різної електричної віддаленості від точки КЗ; значення періодичної складової струму КЗ у довільний момент часу t , віднесені до початкового значення при $t = 0$ цієї складової:

$$\gamma_{t,AD} = I_{П,t,AD} / I_{П,0,AD} \cdot \quad (9.8)$$

Електрична віддаленість місця КЗ від асинхронного електродвигуна оцінюється відношенням діючого значення перехідної складової струму двигуна у початковий момент часу виникнення КЗ до його номінального струму:

$$I_{*(ном)П,0,AD} = I_{П,0,AD} / I_{ном,AD} \cdot \quad (9.9)$$

Послідовність дій в обчисленні діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу t аналогічна викладеній у підрозд. 5.2 відносно використання типових кривих генераторів. Натуральне значення періодичної складової струму КЗ для моменту часу t :

$$I_{П,t,AD} = \gamma_{t,AD} I_{П,0,AD} \quad (9.10)$$

або (при розрахунку у відносних одиницях виміру за базисними умовами):

$$I_{П,t,AD} = \gamma_{t,AD} I_{*(б)П,0,AD} I_b \cdot \quad (9.11)$$

Підживлення місця короткого замикання від синхронних двигунів. Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням зовнішнього опору також обчислюють за (9.4), де замість $x''_{*(ном)AD}$ підставляють $x''_{*(ном)CD}$. При цьому знаходять е.р.с. $E_{*(ном)0}$, вважаючи, що до КЗ двигун працював у номінальному режимі з перезбудженням. За відсутності первинних даних наближено беруть $E_{*(ном)0} = 1,1$.

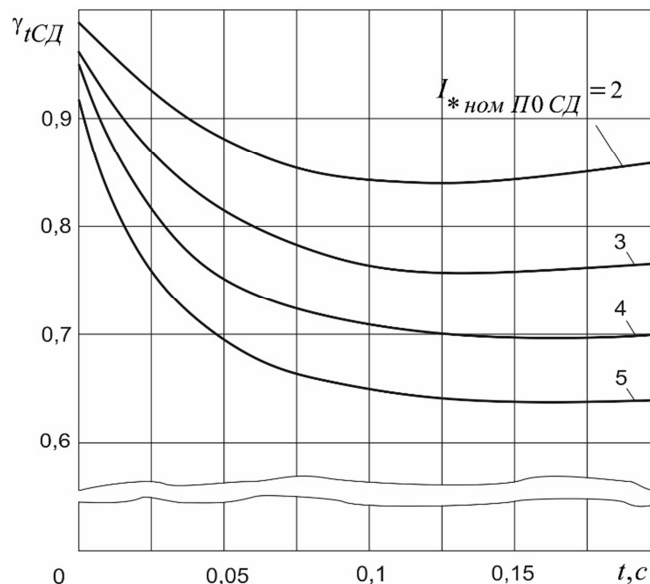


Рис. 9.3. Зміна у часі періодичної складової струму КЗ (синхронний двигун)

Діюче значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу в радіальній схемі ввімкнення до місця КЗ визначають за типовими кривими синхронних двигунів (рис. 9.3). Криві характеризують зміну періодичної складової струму у часі до 0,2 с для різної електричної віддаленості точки КЗ від двигуна. На графіках значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу віднесені до значення цієї складової при $t = 0$:

$$\gamma_{t,CD} = I_{П,t,CD} / I_{П,0,CD} \quad (9.12)$$

Електрична віддаленість місця КЗ оцінюється відношенням початкового значення періодичної складової струму синхронного двигуна при $t=0$ до його номінального струму:

$$I_{*(ном)П,0,CD} = I_{П,0,CD} / I_{ном,CD} \quad (9.13)$$

Послідовність дій в обчисленні діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу аналогічна викладеній для генератора та асинхронного двигуна. Натуральне значення цієї складової струму в довільний момент часу t :

$$I_{П,t,CD} = \gamma_{t,CD} I_{П,0,CD} = \gamma_{t,CD} I_{*(б)П,0,CD} I_{б} \quad (9.14)$$

Уточнені методи передбачають розрахунки періодичної складової струму КЗ від асинхронних або синхронних двигунів для довільного моменту часу на основі розв'язку відповідних систем диференціальних рівнянь перехідних процесів цих машин з використанням комп'ютерної техніки.

Аперіодичну складову струму КЗ, створювану синхронним чи асинхронним двигуном, для довільного моменту часу розраховують за формулою:

$$i_{a,t,дв} = \sqrt{2} I_{П,t=0,дв} \exp(-t / T_{a,дв}), \quad (9.15)$$

де $T_{a,дв}$ – стала часу затухання аперіодичної складової струму КЗ електродвигуна, наведена в табл. 9.1 (асинхронні двигуни), або визначається за типовими кривими рис. 9.4 (синхронні двигуни).

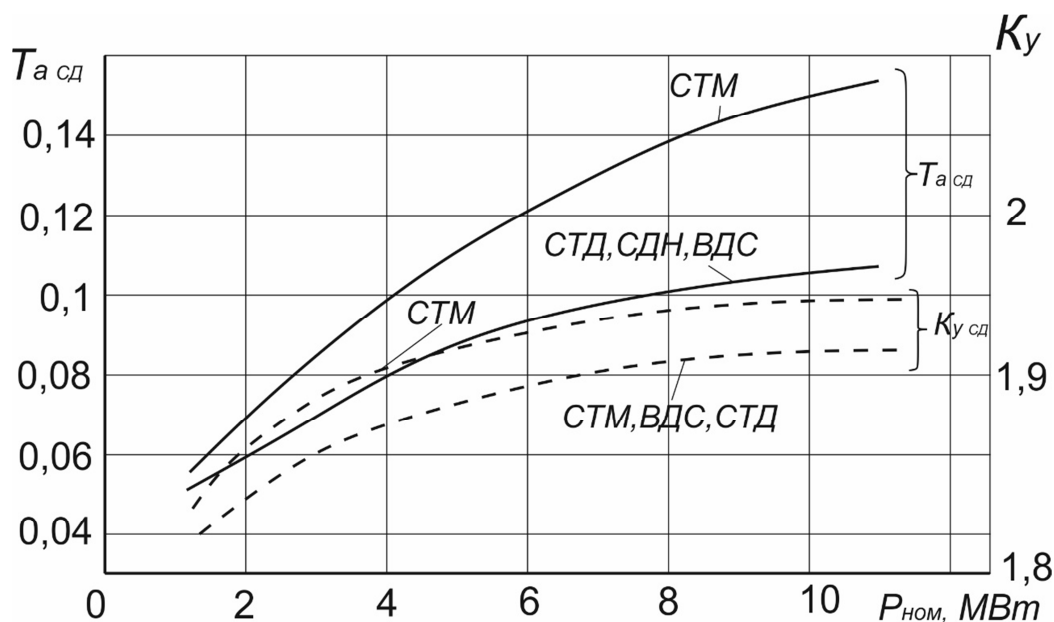


Рис. 9.4. Криві для визначення значень ударного коефіцієнта та сталої часу затухання аперіодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними двигунами залежно від їх потужності та типу

Таблиця 9.1

Значення сталої часу та ударного коефіцієнта асинхронних двигунів при короткому замиканні на їх затискачах

Параметр	Двигун						
	А	АО	ДАЗО	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T'_{\text{дв,роз,с}}$	0,04	0,04	0,09	0,04/S _н	0,075	0,06	0,044
$T_{a,AD,с}$	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$k_{y,дв}$	1,56	1,49	1,5	1,6	1,67	1,66	1,55

У разі врахування зовнішнього опору сталу часу $T_{a,дв}$ обчислюють за формулами:

– для асинхронних двигунів:

$$T_{a,AD,роз} = \frac{x''_{*(ном)AD} + x''_{*(ном)зи}}{\omega \left[x''_{*(ном)AD} / (\omega T_{a,AD}) + r''_{*(ном)зи} \right]}; \quad (9.16)$$

– для синхронних двигунів:

$$T_{a,CD,роз} = \frac{x''_{*(ном)CD} + x''_{*(ном)зи}}{\omega \left[x''_{*(ном)CD} / (\omega T_{a,CD}) + r''_{*(ном)зи} \right]}. \quad (9.17)$$

Ударний струм КЗ від двигуна:

$$i_{y,дв} = \sqrt{2} \cdot k_{y,дв} I_{n,t=0,дв}^{(3)}. \quad (9.18)$$

Тут $k_{y,дв}$ – ударний коефіцієнт, обчислюваний з урахуванням зовнішнього опору:

• для асинхронного двигуна:

$$k_{y,AD} = \exp(-0,01/T'_{\text{дв,роз}}) + \exp(-0,01/T_{a,AD,роз}); \quad (9.19)$$

• для синхронного двигуна:

$$k_{y,CD} = 1 + \exp(-0,01/T_{a,CD,роз}), \quad (9.20)$$

де $T'_{\text{дв,роз}}$ – розрахункова стала часу затухання періодичної складової струму асинхронного двигуна (табл. 9.1), обчислена аналогічно (залежність 9.16) з урахуванням зовнішнього опору мережі.

Коли зовнішній опір не враховують:

$$Z''_{*(ном)зи} < (0,1 \dots 0,2) x''_{*(ном)дв}, \quad (9.21)$$

то значення ударного коефіцієнта визначають за табл. 1 або типовими кривими рис. 9.4.

Повний струм у місці КЗ в радіальній схемі вмикання N двигунів знаходять підсумовуванням за періодичними та аперіодичними складовими струму від всіх джерел живлення місця КЗ (залежність 9.22):

$$I_{\Pi,t} = I_{\Pi,t,GS} + \sum_{i=1}^N I_{\Pi,t,дв,i};$$

$$i_{a,t} = \sqrt{2} I_{\Pi,0,GS} \exp(-t/T_{a,GS}) + \sqrt{2} \sum_{i=1}^N I_{\Pi,0,дв,i} \exp(-t/T_{a,дв,i}). \quad (9.22)$$

Ударний струм у точці КЗ визначається за виразом (залежність 9.23):

$$i_{y, \partial \delta} = \sqrt{2} \cdot \left(k_{y, GS} I_{\Pi, 0, GS}^{(3)} + \sum_{i=1}^N k_{y, \partial \delta, i} I_{\Pi, 0, \partial \delta, i}^{(3)} \right). \quad (9.23)$$

При розрахунку підживлення за $t < 0,2 c$ асинхронні (m) та синхронні (n) двигуни можна замінити еквівалентним двигуном й визначити початкове сумарне значення періодичних складових струму групи електродвигунів:

$$I_{\Pi, 0, \partial \delta, \Sigma} = \sum_{i=1}^m I_{\Pi, 0, АД, i} + \sum_{j=1}^n I_{\Pi, 0, СД, j}. \quad (9.24)$$

Для еквівалентного двигуна також розраховують:

– сумарний номінальний струм:

$$I_{ном, \partial \delta, ек} = \sum_{i=1}^m I_{ном, АД, i} + 1,2 \sum_{j=1}^n I_{ном, СД, j}; \quad (9.25)$$

– кратність пускового струму:

$$I_{*(ном)пуск, ек} = I_{\Pi, 0, \partial \delta, \Sigma} / I_{ном, \partial \delta, ек}; \quad (9.26)$$

– надперехідний опір:

$$x_{*(ном)ек}'' = 1 / I_{*(ном)пуск, ек}; \quad (9.27)$$

– сталу часу затухання періодичної складової струму КЗ:

$$T_{\Pi, ек} = \sum_{i=1}^m T_{\Pi, АД, роз, i} I_{\Pi, 0, АД, i} / \sum_{i=1}^m I_{\Pi, 0, АД, i}; \quad (9.28)$$

– сталу часу затухання аперіодичної складової струму КЗ:

$$T_{a, ек} = \left(\sum_{i=1}^m T_{a, АД, роз, i} I_{\Pi, 0, АД, i} + \sum_{j=1}^n T_{a, СД, роз, j} I_{\Pi, 0, СД, j} \right) / I_{\Pi, 0, \partial \delta, \Sigma}. \quad (9.29)$$

Тут $I_{ном, АД, i}$, $I_{ном, СД, j}$ – номінальні струми груп $\{I; m\}$ асинхронних та $\{I; n\}$ синхронних двигунів; $T_{\Pi, АД, i}$ – розрахункові сталі часу затухання періодичної складової струму у групі асинхронних двигунів; $T_{a, АД, i}$, $T_{a, СД, j}$ – постійні часу затухання аперіодичної складової струму у групах асинхронних та синхронних двигунів.

При КЗ за узагальненим зовнішнім опором початкове значення періодичної складової струму КЗ від еквівалентного двигуна:

$$I_{\Pi, 0, \partial \delta, ек} \approx I_{*(ном)пуск, \partial \delta, ек} I_{ном, \partial \delta, ек} / \left(1 + \frac{Z_{*(ном)зи}''}{x_{*(ном)ек}''} \right). \quad (9.30)$$

Складові струму КЗ від еквівалентного двигуна розраховують за формулами:

- періодична

$$I_{\Pi, t, ек} = I_{\Pi, 0, \partial \delta, ек} \exp(-t / T_{\Pi, \Sigma}), \quad (9.31)$$

де

$$T_{\Pi, \Sigma} = T_{\Pi, ек} \left(1 + \frac{Z_{*(ном)зи}''}{x_{*(ном)ек}''} \right); \quad (9.32)$$

- аперіодична

$$i_{a,t,\Sigma} = \sqrt{2} I_{II,0,\partial v,ek} \exp(-t / T_{a,\Sigma}), \quad (9.33)$$

де

$$T_{a,\Sigma} = \frac{x_{*(ном)ек}'' + x_{*(ном)зи}}{\omega \left[x_{*(ном)ек}'' / (\omega T_{a,ек}) + r_{*(ном)зи} \right]}. \quad (9.34)$$

Ударний струм КЗ, створюваний еквівалентним електродвигуном, визначається виразом:

$$i_{y,\Sigma} = \sqrt{2} \cdot k_{y,\Sigma} I_{II,0,\partial v,ek}^{(3)}, \quad (9.35)$$

де

$$k_{y,\Sigma} = \exp(-0,01/T_{n,\Sigma}) + \exp(-0,01/T_{a,\Sigma}). \quad (9.36)$$

Якщо точка КЗ у схемі знаходиться за узагальненим зовнішнім опором для групи двигунів та електричної системи, то при $t > 0,2$ с струми КЗ розраховують у відповідних відомих схемах.

Підживлення місця короткого замикання від двигунів теплових електростанцій

При оцінці аварійних режимів, що виникають внаслідок КЗ, в електроустановках власних потреб теплових електростанцій (ТЕС) необхідно враховувати струми, генеровані в місці КЗ двигунами. У визначенні цих струмів на відгалуженні від секції розподільного улаштування рекомендується обирати груповий облік двигунів. Останні заміняють еквівалентним двигуном із сумарною потужністю $P_{ном}$ та середніми значеннями розрахункових параметрів (табл. 9.2):

Табл. 9.2

Розрахункові параметри

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{ек}$	0,87
К.К.Д $\eta_{ек}$	0,94
Кратність пускового струму $I_{*(ном)пуск,ек}$	5,6
Стала часу затухання періодичної	0,07
Стала часу затухання аперіодичної	0,04
Ударний коефіцієнт k_y	1,85

Розрахункову схему стану при КЗ на теплових електростанціях слід вибирати з урахуванням відповідної схеми робочого електропостачання. При врахуванні резерву за розрахункові умови КЗ доцільно брати такі, за яких секція розподільного улаштування власних потреб живиться за контуром з меншим значенням електричного опору і в підживленні місця КЗ беруть участь всі двигуни секції. Для врахування прихованого резервування вважають, що один з робочих трансформаторів живлення власних потреб вимкнений і місце КЗ підживлюють двигуни двох секцій, сполучених між собою резервно.

Обчислення струмів КЗ в електроустановках власних потреб ТЕС з метою вибору або перевірки параметрів їх провідників та апаратів передбачає визначення описаного далі. Передусім на основі отриманої схеми заміщення

знаходять періодичну складову струму КЗ від джерел електричної системи (GS). Сталу часу затухання аперіодичної складової струму від електричної системи $T_{a,GS}$ можна визначати за графічною залежністю (рис. 9.5), побудованою з урахуванням номінальної потужності трансформатора $S_{ном,тр}$ (при використанні трансформатора з розщепленими обмотками розуміють номінальну потужність обмотки, до якої приєднана секція розподільного улаштування). Якщо трансформатор сполучений з секцією через протяжний струмовід, то сталу часу $T_{a,GS}$ розраховують за опором струмоводу.

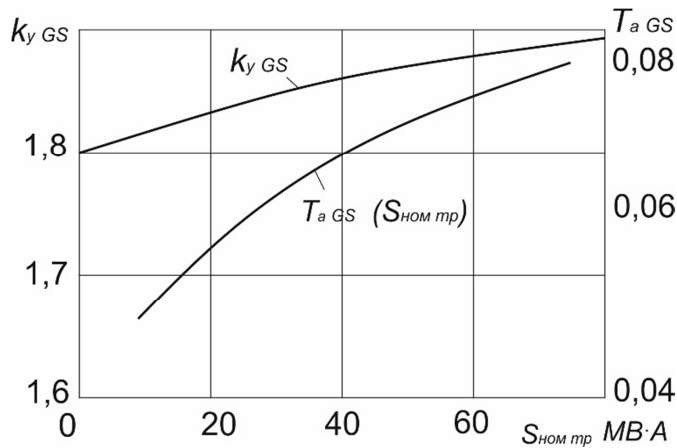


Рис. 9.5. До визначення сталої часу затухання аперіодичної складової струму КЗ та ударного коефіцієнта

Далі обчислюють:

- початкове значення періодичної складової струму КЗ, що створюване електродвигунами секції (при прихованому резервуванні двох секцій):

$$I_{II,0,\partialв,ек} = I_{*(ном)}_{пуск,ек} P_{ном,\Sigma} / (\sqrt{3} \eta_{ек} U_{ном} \cos \varphi_{ном}), \quad (9.37)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга двигунів секції;

- сумарне початкове значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{II,0,\Sigma} = I_{II,0,GS} + I_{II,0,\partialв,ек}; \quad (9.38)$$

- сумарне значення періодичної складової струму КЗ у момент часу:

$$I_{II,\tau,\Sigma} = I_{II,\tau,GS} + I_{n,0,\partialв,ек} \cdot \exp(-\tau / T_{II,ек}) = I_{II,\tau,GS} + \gamma_{\tau,ек} I_{II,0,\partialв,ек}, \quad (9.39)$$

де $\gamma_{\tau,ек}$ – коефіцієнт затухання періодичної складової струму КЗ (рис. 9.6);

- сумарне значення аперіодичної складової струму КЗ у момент часу τ :

$$\begin{aligned} i_{a,\tau,\Sigma} &= \sqrt{2} I_{II,0,GS} \cdot \exp(-\tau / T_{a,GS}) + \sqrt{2} I_{II,0,\partialв,ек} \cdot \exp(-\tau / T_{a,ек}) = \\ &= \sqrt{2} I_{II,0,GS} \cdot \exp(-\tau / T_{a,GS}) + \sqrt{2} \beta_{\tau,ек} I_{II,0,\partialв,ек}, \end{aligned} \quad (9.40)$$

де $\beta_{\tau,екв}$ – коефіцієнт затухання аперіодичної складової струму КЗ (рис. 5.15); $i_{y,\Sigma}$ – сумарний ударний струм КЗ:

$$i_{y,\Sigma} = \sqrt{2} \cdot (k_{y,GS} I_{II,0,GS} + k_{y,ек} I_{II,0,\partialв,ек}). \quad (9.41)$$

Значення $k_{y,GS}$ знаходять за Рис.9.6, якщо не зважати на опір струмоводу в колі трансформатора власних потреб.

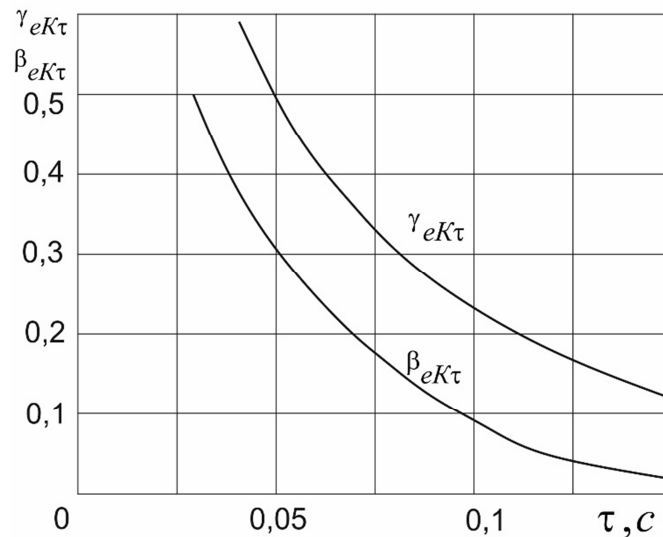


Рис. 9.6. До визначення коефіцієнтів затухання аперіодичної та періодичної складових струму КЗ

ОСНОВНІ ВИЗНАЕННЯ

1. Навантаження за складом – комплексне і в ньому можна виділити основні типи: асинхронні та синхронні двигуни, тягові агрегати на постійному чи змінному струмі, статичні електроспоживачі (печі, освітлення, зварювальні агрегати, перетворювальні установки тощо), компенсуючі та симетруючі пристрої.

2. В інженерних розрахунках обмежуються наближеним обліком підживлення місця КЗ від вузлів промислового навантаження.

3. У системі зовнішнього електропостачання (живильні мережі напругою понад 35 кВ) вузол навантаження здебільшого електрично віддалений від місця КЗ.

4. У системах внутрішнього електропостачання (розподільні мережі напругою 10 кВ і нижче) слід враховувати вузлові тимчасові джерела у підживленні місця КЗ: двигуни, компенсувальні установки реактивної потужності.

5. За час перехідного процесу значення струму змінюються у бік зменшення: від синхронного двигуна – до сталого (визначається струмом збудження), а від асинхронного двигуна – до нуля.

6. Через перехід потужних двигунів в генераторний режим збільшення значення струму в місці КЗ може бути досить суттєвим, якщо вони безпосередньо ввімкнені до місця КЗ.

7. Слід враховувати двигуни, зв'язані з місцем КЗ безпосередньо або через ЛЕП, струмоводи, лінійні реактори чи двообмотковий трансформатор, що мають порівняно невеликий електричний опір.

8. Струм від двигунів враховують для перевірки апаратів розподільних улаштувань 6...10 кВ та провідників за умов роботи при КЗ, а також для розрахунку та регулювання засобів захисту.

9. При обчисленнях у відносних одиницях виміру за базисні величини беруть номінальні напруги та потужність електродвигунів.

10. Зміст розрахунку струму КЗ від двигунів у генераторному режимі, залежить від схем підключення до СЕП.

11. Діюче значення періодичної складової струму КЗ у довільний момент часу при радіальній схемі ввімкнення можна обчислити за спрощеним методом, використавши типові криві для електродвигунів.

12. Електрична віддаленість місця КЗ від асинхронного електродвигуна оцінюється відношенням діючого значення перехідної складової струму двигуна у початковий момент часу виникнення КЗ до його номінального струму.

13. Діюче значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу в радіальній схемі підключення до місця КЗ визначають за типовими кривими синхронних двигунів.

14. Електрична віддаленість місця КЗ оцінюється відношенням початкового значення періодичної складової струму синхронного двигуна до його номінального струму.

15. При оцінці аварійних режимів, що виникають внаслідок КЗ, в електроустановках власних потреб теплових електростанцій (ТЕС) необхідно враховувати струми, генеровані в місці КЗ двигунами.

16. У визначенні цих струмів на відгалуженні від секції розподільного обладнання рекомендується обирати груповий облік двигунів. Останні замінюють еквівалентним двигуном із сумарною потужністю $P_{ном}$ та середніми значеннями розрахункових параметрів.

17. Розрахункову схему стану при КЗ на теплових електростанціях слід вибрати з урахуванням відповідної схеми робочого електропостачання.

18. При врахуванні резерву за розрахункові умови КЗ доцільно брати такі, за яких секція розподільного обладнання власних потреб живиться за контуром з меншим значенням електричного опору і в підживленні місця КЗ беруть участь всі двигуни секції.

19. Для врахування прихованого резервування вважають, що один з робочих трансформаторів живлення власних потреб вимкнений і місце КЗ підживлюють двигуни двох секцій, сполучених між собою резервно.

Тестові питання по темі 9

1. Які особливості характеристик вузлів навантаження?
2. Як оцінити підживлення місця короткого замикання від двигунів?
3. Які умови переходу двигунів в генераторний режим?
4. Як визначають початкове діюче значення періодичної складової струму короткого замикання асинхронних двигунів?
5. Як визначають початкове діюче значення періодичної складової струму короткого замикання синхронних двигунів?
6. Як визначити діюче значення періодичної складової струму короткого замикання у довільний момент часу для асинхронних двигунів?
7. Описати типові криві для асинхронних двигунів?

8. Як визначити електричну віддаленість місця короткого замикання для асинхронних (синхронних) двигунів?
9. Описати типові криві для синхронних двигунів.
10. Як визначити діюче значення періодичної складової струму короткого замикання у довільний момент часу для синхронних двигунів?
11. Як визначається аперіодична складова струму КЗ від двигунів, ударний струм короткого замикання від двигунів.
12. Визначення ударного коефіцієнта для двигунів.
13. Описати повний та ударний струми у місці короткого замикання в радіальній схемі вмикання двигунів.
14. Розрахунок параметрів в аварійному режимі для еквівалентного двигуна.
15. Особливості розрахунку підживлення місця короткого замикання (еквівалентний двигун).
16. Оцінити залежності визначення коефіцієнтів затухання складових струму короткого замикання (еквівалентний двигун).
17. Як визначити підживлення місця короткого замикання від двигунів теплових електростанцій?

ТЕМА 10

КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРУГОЮ ДО 1 кВ

Загальні положення

Місце КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ більшості систем електропостачання промислових підприємств характеризується як значно електрично віддалене від джерел ЕЕС. Установлена потужність цих електроустановок звичайно помітно перевищує споживану. Якщо остання більш як у 25 разів виходить за межі *потужності їх знижувальних трансформаторів*, то на стороні низької напруги знижувальних трансформаторів амплітуду періодичної складової струму КЗ від енергосистеми можна вважати незмінною.

Ці ознаки обґрунтовують припущення, що електроустановки напругою до 1 кВ промислових підприємств ввімкнені до джерела необмеженої потужності. Останнє еквівалентують значенням е.р.с., рівним значенню напруги у місці вмикання, і опором зв'язку джерел ЕЕС з точкою вмикання. Значення опору зв'язку зводиться до *нижчої напруги* за формулою, мОм:

$$x_{GS} = U_{cp,HH}^2 / (\sqrt{3} I_{II,BH} U_{cp,BH}) = U_{cp,HH}^2 \cdot 10^{-3} / S_k$$

або

$$x_{GS} = U_{cp,HH}^2 / (\sqrt{3} I_{вим,ном} U_{cp,HH}), \quad (10.1)$$

де $U_{cp,HH}$ – середня номінальна напруга мережі, ввімкненої до обмотки *нижчої напруги* трансформатора, В; $U_{cp,BH}$ – середня номінальна напруга мережі, до якої ввімкнена обмотка *вищої напруги* трансформатора, В; $I_{II,BH}$ – діюче значення періодичної складової струму при трифазному КЗ біля виводів обмотки вищої напруги трансформатора, кА; S_k – потужність КЗ біля виводів обмотки *вищої напруги* трансформатора, МВ·А; $I_{вим,ном}$ – номінальний струм вимкнення для вимикача, встановленого у приєднанні *знижувального* трансформатора, кА.

У випадках, коли знижувальний трансформатор увімкнений до мережі енергосистеми через реактор, повітряну чи кабельну лінію (завдовжки понад кілометр), необхідно враховувати індуктивну та активну складові їх опору.

У розрахунках струмів КЗ в електроустановках з автономними джерелами електроенергії слід знаходити *значення параметрів усіх елементів* автономної електричної системи разом з автономними джерелами (синхронними генераторами), розподільною мережею та споживачами, а також ураховувати:

- зміну активної складової опору провідників короткозамкненого кола внаслідок їх нагрівання при КЗ;
- вплив комплексного навантаження (двигуни, перетворювачі, термічні установки, лампи освітлення) на значення струму КЗ, якщо його *номінальний струм перевищує 10 %* від початкового значення періодичної складової струму КЗ (без навантаження);
- вплив конденсаторних батарей при розрахунку струму КЗ для вибору запобіжників.

При цьому *допускається*:

- максимально спрощувати і еквівалентувати всю зовнішню мережу стосовно місця КЗ та індивідуально враховувати лише автономні джерела електроенергії і двигуни, що безпосередньо прилягають до місця КЗ;
- не враховувати вплив асинхронних двигунів, якщо їх сумарний номінальний струм не перевищує 10 % від початкового значення періодичної складової струму в місці КЗ (без уваги на двигуни).

Розрахункові умови

Струми КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ обчислюють в іменованих одиницях виміру. Під час складання еквівалентних схем заміщення параметри елементів початкової розрахункової схеми зводять до ступеня напруги, де міститься точка КЗ, і виражають значення опорів усіх еквівалентів у схемі заміщення в *міліомах*.

Вірогідність результатів розрахунку струмів КЗ залежить від того, наскільки правильно оцінені та повно враховані елементи і їх опори у колі КЗ. В електроустановках напругою до 1 кВ на значення струмів КЗ суттєво впливають активні складові опорів кола КЗ. Їхні значення *сумірні*, а *іноді й перевищують* значення індуктивних складових опорів. Тому при визначенні результуючого опору кола КЗ ураховують опори ділянок збірних шин, магістральних та розподільних шинопроводів, опори струмових котушок автоматичних вимикачів та реле, обмоток трансформаторів струму, контактів комутаційних апаратів, перехідних контактів у мережі та розподільних улаштуваннях, опір дуги у місці КЗ.

Параметри елементів короткозамкненого кола *обчислюють таким чином*.

Силові трансформатори. Повне значення, активна та індуктивна складові опору знижувального трансформатора, зведені до ступеня НН (мОм), розраховують за формулами:

$$\begin{aligned} Z_{mp} &= u_k U_{ном,НН}^2 \cdot 10^4 / S_{mp}; \\ r_{mp} &= p_k U_{ном,НН}^2 \cdot 10^6 / S_{mp}^2; \\ x_{mp} &= \sqrt{u_k^2 - (100 p_k / S_{mp})^2} \cdot U_{ном,НН}^2 \cdot 10^4 / S_{mp}, \end{aligned} \quad (10.2)$$

де S_{mp} – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; $U_{ном,НН}$ – номінальна лінійна напруга обмотки НН трансформатора, кВ; p_k – втрати активної потужності КЗ у трансформаторі, кВт; u_k – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Активні та індуктивні складові опори нульової послідовності *знижувальних трансформаторів*, обмотки яких з'єднані за схемою Δ/Y_0 при КЗ у мережі нижчої напруги, беруть рівними відповідно до активних та індуктивних складових опорів прямої послідовності. За *інших схем з'єднання* обмоток трансформаторів активні та індуктивні складові опори нульової послідовності необхідно брати відповідно до вимог виготівників.

Шини та струмоводи з шин. Опори визначають значеннями активних та індуктивних складових, віднесених до одиниці довжини.

Детально це висвітлено в рекомендованому Вам підручнику (розділ 5).

Повітряні та кабельні лінії. Значення активного та індуктивного опорів ЛЕП також обчислюють з використанням табличних даних, які достатньо повно наведені у довідковій літературі. Індуктивний опір наближено для ПЛ дорівнює 0,4, а для КЛ – 0,08 мОм/м.

Реактори. Активна складова опору струмообмежувального реактора (мОм):

$$r_p = \Delta p_{ном,p} \cdot 10^3 / I_{ном,p}^2, \quad (10.3)$$

де $\Delta p_{ном,p}$ – втрата активної потужності у фазі реактора за номінального струму, Вт; $I_{ном,p}$ – номінальний струм реактора, А.

Індуктивну складову опору реактора беруть за інформацією його виготівника або розраховують за формулою (мОм):

$$x_p = \omega(L - M) \cdot 10^3, \quad (10.4)$$

де ω – кутова частота напруги мережі, рад/с; L – індуктивність котушки трифазного реактора, Гн; M – взаємна індуктивність віток реактора, Гн.

Трансформатори струму, комутаційні апарати та реле. Значення їх опорів – у довідковій літературі залежно від номінального струму. Для первинних обмоток усіх багатовиткових вимірювальних трансформаторів струму варто використовувати їхні паспортні дані або середні значення. Для одновиткових трансформаторів (на струми понад 500 А) при розрахунку струмів КЗ опором можна нехтувати.

Детально – звертатися до підручника.

Для котушок розчіплювачів автоматичних вимикачів припускається (з відсутністю даних виготовлювачів про індуктивні та активні складові опорів) використовувати значення опорів котушок розчіплювачів та перехідних опорів рухомих контактів (*детально* – звертатися до підручника). Там подані узагальнені сумарні значення опорів котушок розчіплювачів та контактів автоматичних вимикачів (А3700, “Електрон” та ВА) залежно від номінального струму.

Контактні переходи в електричній мережі. Значення опорів контактів у з’єднанні кабелів, рознімних контактів комутаційних апаратів та струмоводів наведені відповідно у підручнику (опори контактних з’єднань для найхарактерніших місць з’єднання: струмовід з шин – автоматичний вимикач, кабель – автоматичний вимикач).

Дуга у місці КЗ. Для обліку дуги рекомендується використовувати наближені значення активного опору дуги (*детально* – рекомендовано підручник). При розрахунку найбільших значень струму КЗ його не враховують.

Активні складові електричних опорів елементів апаратури та пристроїв, контактів, дуги у місці КЗ можна також визначати у складі результуючого перехідного електричного опору:

$$r_{II} = r_k + r_{AB} + r_{TC} + r_d. \quad (10.5)$$

Тут r_k – перехідний електричний опір контактів у з’єднанні елементів мережі; r_{AB} – активний електричний опір автоматичного вимикача, що складається з активного опору струмових котушок розчіплювача та перехідного опору

контактів; r_{TC} – активний електричний опір первинної обмотки трансформатора струму; r_{δ} – активний електричний опір дуги у місці КЗ.

Результуючий опір залежить від потужності знижувального трансформатора комплектної трансформаторної підстанції (КТП), електричної віддаленості місця КЗ за ступенями розподілу електричної енергії (ступінь КЗ) та мінімальної відстані між фазами у місці КЗ. Нижче наведені значення r_{II} при КЗ на стороні нижчої напруги КТП:

- *потужність трансформаторів, кВ·А* 400 630 1000 1800 2500
- *перехідний опір, мОм* 9,21 8,02 8,41 5,51 5,12

Автономні джерела електроенергії та синхронні двигуни для моменту часу $t = 0$ враховують у вигляді джерела е.р.с. з надперехідним опором синхронної машини за поздовжньою віссю x_d'' . При інженерних розрахунках беруть: $x_{*(ном)d}'' = 0,15$; $x_{*(ном)2}'' = x_{*(ном)d}''$; $r_{*(ном)CD} = 0,15 x_{*(ном)d}''$.

Асинхронні двигуни для $t = 0$ слід вводити до схеми заміщення у вигляді джерела е.р.с. з надперехідним індуктивним опором x_{AD}'' . За уточнених розрахунків струму КЗ асинхронні двигуни вводять до схеми заміщення джерелом е.р.с. з надперехідними індуктивною та активною складовими опору статора.

При інженерних розрахунках беруть: $x_{*(ном)AD} = 0,18$; $r_{*(ном)AD} = 0,36$.

Комплексне навантаження при розрахунку струмів несиметричних КЗ подається параметрами прямої, зворотної та нульової послідовностей. Рекомендовані значення опорів прямої та зворотної послідовностей окремих елементів комплексного навантаження наведено в рекомендованому підручнику (розділ 1).

При спрощених розрахунках допускається еквівалентувати комплексне навантаження у місці КЗ значеннями модулів повних електричних опорів:

$$Z_{*(ном)1,нв}^* = Z_{*(ном)2,нв}^* = 0,4; \quad Z_{*(ном)0,нв}^* = 0,3. \quad (10.6)$$

Конденсаторні батареї. Значення активної складової опору, індуктивності та ємності конденсаторних батарей беруть за даними заводів-виготовлювачів. Результуючі складові $x_{1,рез}$ і $r_{1,рез}$ опору прямої послідовності кола КЗ знаходять шляхом перетворення схеми заміщення за рекомендаціями підрозд. 1.6 з урахуванням активного перехідного опору (звернутися до підручника). Струм КЗ визначають за знайденими значеннями активної та реактивної складових результуючого опору.

Якщо поблизу місця КЗ є синхронні та асинхронні двигуни або інші складові комплексних навантажень, то початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням підживлення слід визначати як суму струмів від енергосистеми (автономних джерел), двигунів чи інших складових комплексного навантаження.

Розрахунок струмів аварійних режимів. Початкове діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ від *енергосистеми* розраховують за формулою, кА:

$$I_{П,0,GS} = U_{cp,ном} / \left(\sqrt{3} \sqrt{r_{1,pez,GS}^2 + x_{1,pez,GS}^2} \right). \quad (10.7)$$

В електроустановках з автономними джерелами початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ визначають за формулою, кА:

$$I_{n,0,G} = E_{\phi,t=0,G} / \left(\sqrt{r_{1,pez,G}^2 + x_{1,pez,G}^2} \right), \quad (10.8)$$

де $E_{\phi,t=0,G}$ – еквівалентна надперехідна електрорушійна сила автономних джерел, В (її значення розраховують так, як і для синхронних двигунів).

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ від *синхронних двигунів* визначають з виразу, кА:

$$I_{П,0,CD} = E_{\phi,0,CD} / \left(\sqrt{r_{1,pez,CD}^2 + x_{1,pez,CD}^2} \right), \quad (10.9)$$

де $E_{\phi,t=0,CD}$ – фазне значення надперехідної електрорушійної сили синхронного двигуна, В:

$$E_{\phi,0,CD} = \sqrt{\left(U_{\phi(0)} \pm I_{(0)} x_d'' \sin \varphi_{(0)} \right)^2 + \left(I_{(0)} x_d'' \cos \varphi_{(0)} \right)^2}, \quad (10.10)$$

де знак операції “+” – у стані перезбудження, а “-” – недозбудження; $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ – відповідно фазна напруга на затискачах двигуна, струм статора та кут зсуву фаз напруги і струму у момент часу, що передує КЗ (звичайно їх беруть тотожними номінальним значенням).

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ від *асинхронних двигунів* розраховують за формулою, кА:

$$I_{П,0,AD} = E_{\phi,0,AD} / \left(\sqrt{r_{1,pez,AD}^2 + x_{1,pez,AD}^2} \right), \quad (10.11)$$

де $E_{\phi,t=0,AD}$ – фазне значення надперехідної е.р.с. асинхронного двигуна, В:

$$E_{\phi,0,AD} = \sqrt{\left(U_{\phi(0)} \cos \varphi_{(0)} - I_{(0)} r_{AD} \right)^2 + \left(U_{\phi(0)} \sin \varphi_{(0)} - I_{(0)} x_{AD}'' \right)^2} \quad (10.12)$$

Вплив комплексного навантаження на сумарний струм КЗ оцінюється залежно від складових комплексного навантаження вузла (тимчасові джерела) та розташування відносно них точки КЗ. У радіальній схемі заміщення допускається не враховувати вплив статичних споживачів (перетворювачі, електротермічні установки, електричне освітлення). При КЗ за спільним для складових джерел вузла навантаження опором початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначається з урахуванням впливу двигунового та статичного навантаження.

Ударний струм трифазного КЗ в електроустановках з одним джерелом енергії (живлення від енергосистеми або автономного джерела) визначають за виразом:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{П,0}, \quad (10.13)$$

де $k_y = 1 + \exp(-t_y / T_a)$ – ударний коефіцієнт, який також може бути визначений за відповідними залежностями рис. 10.1; $\varphi_k = \arctg(x_{1,pez} / r_{1,pez})$ – кут

зсуву за фазою напруги або е.р.с. джерела та періодичної складової струму КЗ;

t_y – момент часу появи ударного струму, с:

$$t_y = 0,01 \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_k \right) / \pi . \quad (10.14)$$

Для наближеного розрахунку ударного струму КЗ на затискачах автономних джерел чи синхронних (асинхронних) двигунів вважають, що ударний струм настає через 0,01 с після початку КЗ і амплітуда періодичної складової струму КЗ у момент $t=0,01$ с дорівнює амплітуді цієї складової у початковий момент часу появи КЗ.

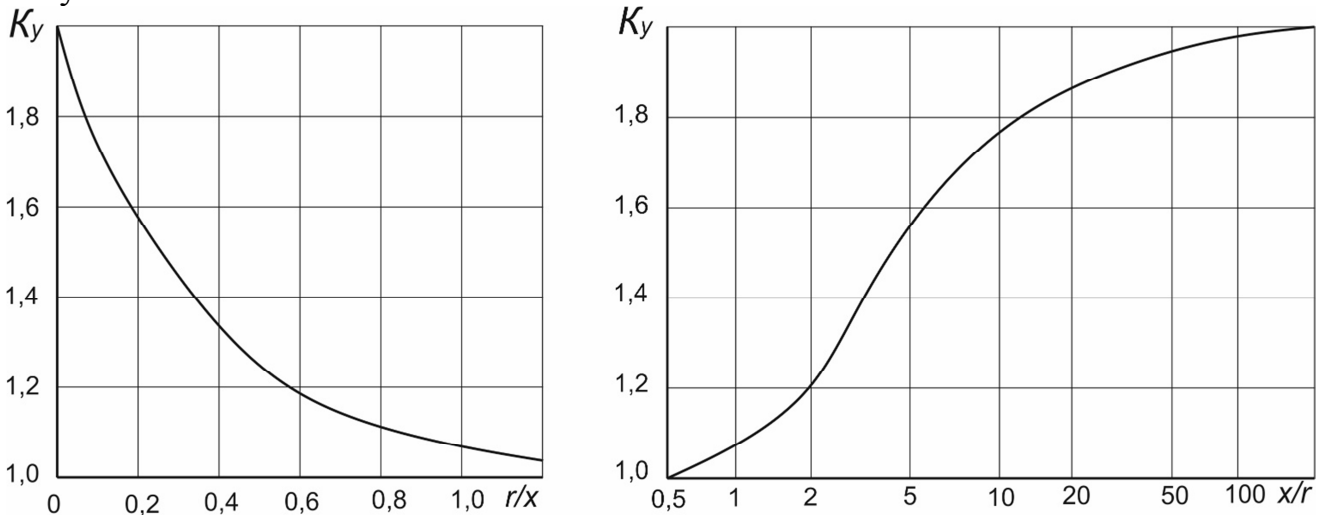


Рис. 10.1. Залежності для визначення ударного коефіцієнта у функції r/x (а) чи x/r (б)

Ударний струм від асинхронного двигуна обчислюють, зважаючи на затухання амплітуди аперіодичної та періодичної складових струму КЗ, які можна обчислити відомими залежностями (див. тему 9). До обчислень визначають:

$$T_p = (x_{AD}'' + x_{1,3ш}) / (\omega \hat{r}_2);$$

$$T_a = (x_{AD}'' + x_{1,3ш}) / (\omega (r_1 + r_{1,3ш})), \quad (10.15)$$

де r_1 – активний опір статора; \hat{r}_2 – активний опір ротора, зведений до статора.

Якщо в точці КЗ збігаються радіальні незалежні одна від одної генеруючі вітки, то ударний струм КЗ визначають як суму ударних струмів окремих віток:

$$i_{y,\Sigma} = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^m k_{y,i} I_{\Pi,0,i}. \quad (10.16)$$

Періодичну складову струму КЗ для довільного моменту часу від автономних джерел електроенергії радіальної схеми вмикання, а також від синхронних двигунів розраховують за допомогою відповідних типових кривих (рис. 10.2). Типові криві характеризують зміну відносних значень (до початкового значення складової) даної складової в часі за різних значень електричної віддаленості від точки КЗ:

$$\gamma_{t,CM} = I_{\Pi,t,CM} / I_{\Pi,0,CM}. \quad (10.17)$$

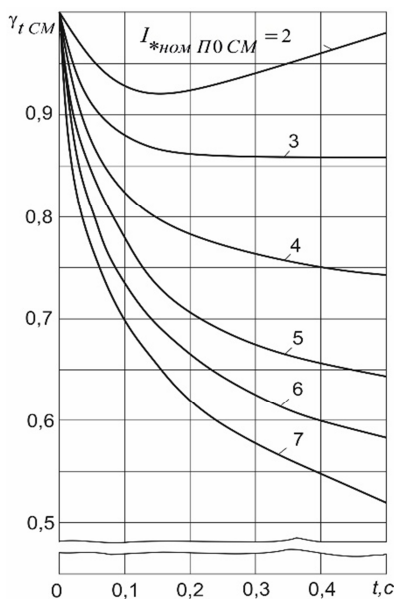


Рис. 10.2. Типові криві для синхронних двигунів

Електричну віддаленість від точки КЗ синхронного двигуна оцінюють відношенням діючого значення періодичної складової струму у початковий момент часу виникнення КЗ до її номінального струму:

$$I_{*(ном)П,0,CM} = I_{П,0,CM} / I_{ном,CM} \quad (10.18)$$

Діюче значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу (або кількох однотипних синхронних двигунів, що в однакових умовах відносно точки КЗ) визначають за формулою:

$$I_{П,t,CM} = \gamma_{t,CM} I_{*(ном)П,0,CM} \cdot I_{ном,CM} \quad (10.19)$$

При визначенні діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу від асинхронних двигунів, у випадку радіальної схеми їх ввімкнення, використовують (10.20) типові криві (рис. 10.3)

$$\gamma_{t,AD} = I_{П,t,AD} / I_{П,t=0,AD} \quad (10.20)$$

Вони побудовані для різної електричної віддаленості від точки КЗ, оцінюваної відношенням:

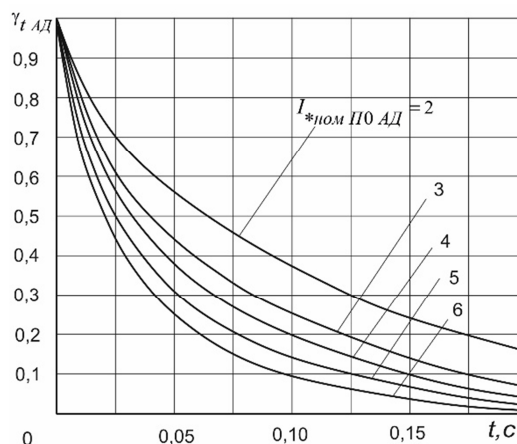
$$I_{*(ном)П,0,AD} = I_{П,0,AD} / I_{ном,AD} \quad (10.21)$$

Тоді для асинхронного двигуна (або кількох, що в однакових умовах відносно точки КЗ) справедливе:

$$I_{П,t,AD} = \gamma_{t,AD} I_{*(ном)П,0,AD} \cdot I_{ном,AD} \quad (10.22)$$

Для уточнення обчислень струму КЗ та його складових слід урахувувати зміну активної складової опору провідників та елементів кола КЗ через їх нагрівання струмом КЗ.

Рис. 10.3. Типові криві для асинхронних двигунів



Розрахунок параметрів елементів

Кабельні ЛЕП, повітряні ЛЕП, струмоводи з шин вираховують відповідно до рекомендацій підручника.

Використання програмного забезпечення для розрахунків

Засоби обчислювальної техніки все частіше використовують для аналізу умов експлуатації та проектування СЕП великих підприємств, інфраструктури міст та сільськогосподарських районів, що потребує повнішого описання перехідних процесів з основних параметрів і характеристик електропостачання та електроспоживання. Розрахунки режимів СЕП при цьому ускладнюються через значну кількість накопичених показників, а при варіюванні початкових даних виникає необхідність в їх неодноразовому повторенні.

Складні схеми електричної мережі підприємств, застосування глибоких введів напругою понад 110 кВ, неоднорідність мережі, значне збільшення потужності джерел енергетичної системи, поєднання різних видів джерел у живленні КЗ, комплексний склад і різкозмінний характер навантаження та низка інших чинників зумовлюють підвищену точність обчислення значень струмів КЗ та автоматизації розрахунків.

Обчислення струмів КЗ з означених вимог до систем електропостачання являє собою містке інженерно-технічне завдання, розв'язання якого істотно полегшується завдяки використанню аналогових моделей та обчислювальної техніки. Застосування ЕОМ дає змогу відмовитися від багатьох припущень при складанні схем заміщення електричної мережі. У розрахункових схемах при цьому вдається, наприклад, точніше враховувати опис роторів та складові показників аварійного режиму. Застосування цифрових ЕОМ для розрахунку електромагнітних перехідних процесів розглядається у можливості “перегляду” в широкому діапазоні значень параметрів елементів системи та обліку не лише їх типу, а й конкретних особливостей. Отже, підвищується точність розрахунку, гарантується вірогідність отриманих результатів при заданих первинних значеннях параметрів для багатьох варіантів схем СЕП та видів КЗ.

Зауважимо, що точність будь-якого розрахунку на цифрових ЕОМ залежить від досконалості закладеної до програми методики та певності початкових даних. Основна вимога до програми розрахунку струмів КЗ у складній електричній системі полягає в тому, що багатоваріантні розрахунки у різних її точках при можливих змінах (перехід від одного режиму до іншого, вмикання (вимикання) віток, аварійні чи оперативні комутації тощо) не повинні збільшувати час на обчислення. Програма має бути універсальною – допускати розрахунок перехідного процесу в будь-якій практично можливій схемі. Ставлять також загальні вимоги, що зводяться до простоти підготовки початкових даних та обробки отриманих результатів, компактності обчислювального алгоритму. Характеристики програми розрахунку струмів КЗ визначають вживаними методом розрахунку та способом реалізації. Основні параметри схеми слід розраховувати за стандартними програмами.

Математичний опис складної СЕП при взятих припущеннях може бути зведений до складання системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У результаті звичайних припущень нехтують насиченням трансформаторів та реакторів,

моделюють навантаження постійними опорами, подають синхронні генератори джерелами напруги з незмінною за амплітудою *e.p.c.* та відповідним опором.

Стан електричної мережі можна описати рівняннями контурних струмів, вузлових напруг або їх комбінаціями.

При розрахунку аварійних режимів – найпоширеніший метод вузлових напруг. Через складнішу реалізацію на ЕОМ метод контурних струмів застосовується рідше, проте він простіший під час обліку взаємної індукції ЛЕП у системі нульової послідовності.

У проектній практиці досить уживані алгоритми та програми розрахунку струмів КЗ, запропоновані інститутом “Енергомережапроект” та ІЕД НАН України. Програми дають змогу здійснювати розрахунки з активними складовими опорів елементів та встановлених розбіжностей *e.p.c.* за модулем та фазою при всіх видах пошкоджень у складних мережах. Для розв’язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь у таких програмах застосовують метод Гаусса чи Z-метод.

Для розрахунку струмів трифазного КЗ за допомогою цифрових ЕОМ запропоновано ітераційний метод, що ґрунтується на поданні електричного стану мережі при КЗ прямою формою системи рівнянь вузлових напруг. Для прискорення збіжності ітераційного процесу обчислення вузлових напруг береться коефіцієнт прискорення. При ітераційному методі розрахунку струмів КЗ особливих вимог до обсягу пам’яті ЕОМ не ставиться, а тому ним слід користуватися при розрахунках схем електричних мереж з великою кількістю вузлів та віток.

Прямий метод розрахунку струмів КЗ з матрицею вузлових опорів схеми ефективніший з такими перевагами перед ітераційним: відсутність труднощів, пов’язаних із збіжністю обчислювального процесу; скорочений час підрахунків; достатньо високий ступінь точності результатів. Тоді електричний стан мережі при КЗ подається оберненою формою системи рівнянь вузлових напруг. Нижче описується алгоритм розрахунку струмів КЗ в електричних мережах, розроблений на основі цього методу.

Початкові дані для розрахунку трифазного КЗ – це визначена схема заміщення мережі, опір віток якої зведений до базисної напруги. Вітки мережі заміщують комплексним опором, генератори задають активними вітками з джерелами *e.p.c.*, увімкненими за перехідними опорами, навантаження – вітками з комплексними опорами. У початковий момент перехідного процесу *e.p.c.* генераторів не змінюють свого значення.

Відзначимо, що цифрові ЕОМ широко використовують для вирішення завдань, пов’язаних з дослідженнями і розрахунком електромагнітних параметрів аварійних режимів в енергетичній системі та великих СЕП. До них належать: визначення впливу на потужність КЗ активної складової опору та ємнісних провідностей ЛЕП напругою 110–750 кВ; розрахунок уставок спрацювання релейного захисту (дистанційного захисту, захисту від КЗ на землю, струмових захистів від міжфазних КЗ) у мережах напругою 500–750 кВ, зважаючи на додаткові чинники (доаварійний режим, ємні провідності ЛЕП та ін.); розрахунок аварійних неповнофазних режимів у складній електричній

мережі; дослідження та розрахунків струмів КЗ, створюваних групою асинхронних чи синхронних двигунів (визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ, затухання періодичної та аперіодичної складових); аналіз та отримання розрахункових кривих для сучасних потужних генераторів.

Похибки оцінки значень струмів короткого замикання

У більшості випадків висока точність оцінки струмів короткого замикання не може бути досягнута у зв'язку з *неповнотою і некоректністю* вихідної інформації, а також похибкою методів розрахунку. Тим часом на практиці спостерігається розвиток і використання складних і громіздких методів, призначених для отримання «точних» значень струмів короткого замикання, що не завжди *забезпечує значимий ефект і не є необхідністю*.

На точність оцінки значень струмів короткого замикання впливають похибки, з якими задаються номінальні параметри електроустаткування і електричних мереж, а також неповнота або невизначеність завдання складу електрообладнання та режимів його роботи. Це суттєво для нелінійних навантажень: вентильні перетворювачі, електротермічні установки, потужні зварювальні комплекси і подібні їм пристрої, параметри яких є функціями навантаження та інших режимних характеристик. Зазначимо наближеність завдання параметрів енергосистеми. Похибки оцінки номінальних даних деяких видів електрообладнання та елементів електричних мереж наведені нижче.

Так, відмінність опорів електричних машин від номінальних (паспортних) значень знаходиться в межах $\pm 5\%$, електрорушійна сила короткого замикання трансформаторів – в тих же межах. Відхилення від номінальних значень індуктивності реакторів – на рівні $\pm 10\%$, ємності конденсаторної батареї – в межах $(-5...+10)\%$.

Похибки еквівалентування опорів при розрахунках струмів короткого замикання без урахування енергосистеми принципово не можуть перевершувати найбільшу з похибок сумарного опору, еквівалентування полягає в основному в операціях додавання послідовних і паралельних активно-реактивних опорів.

Як правило, ця похибка не перевищує 5% . Однак при наявності в мережі нелінійних пристроїв може бути значно більше. Те ж відноситься до опорів прямої і зворотної послідовностей, які використовуються для розрахунку струмів короткого замикання при несиметрії напруг.

Опір зворотної послідовності енергосистеми приймається рівним опору КЗ в розглянутому вузлі і знаходяться в межах $3...13\%$.

Сьогодні розроблені методи вимірювання струмів короткого замикання для початкового моменту часу і похибкою не більше 3% та дещо більшою – для подальших моментів часу. Численні розрахунки і відповідні їм експерименти в електричних мережах дозволяють зробити висновок, що струми КЗ при таких розрахунках визначаються з похибкою до $\pm 7\%$, при спрощеному методі – до $\pm 12\%$.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Місце КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ більшості систем електропостачання промислових підприємств характеризується як значно електрично віддалене від джерел ЕЕС. Установлена потужність цих електроустановок звичайно помітно перевищує споживану.

2. Електроустановки напругою до 1 кВ промислових підприємств ввімкнені до джерела необмеженої потужності.

3. Коли знижувальний трансформатор увімкнений до мережі енергосистеми через реактор, повітряну чи кабельну лінію (завдовжки понад кілометр), необхідно враховувати індуктивну та активну складові їх опору.

4. У розрахунках струмів КЗ в електроустановках з автономними джерелами електроенергії слід знаходити *значення параметрів усіх елементів автономної електричної системи.*

5. Струми КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ обчислюють в іменованих одиницях виміру.

6. Параметри елементів початкової розрахункової схеми зводять до ступеня напруги, де міститься точка КЗ, і виражають значення опорів усіх еквівалентів у схемі заміщення в *міліомах.*

7. В електроустановках напругою до 1 кВ на значення струмів КЗ суттєво впливають активні складові опорів кола КЗ.

8. Для наближеного розрахунку ударного струму КЗ на затискачах автономних джерел вважають, що ударний струм настає через 0,01 с після початку КЗ.

9. Амплітуда періодичної складової струму КЗ у момент $t = 0,01$ с дорівнює амплітуді цієї складової у початковий момент часу появи КЗ.

10. Ударний струм від асинхронного двигуна обчислюють, зважаючи на затухання амплітуди аперіодичної та періодичної складових струму КЗ.

11. Періодичну складову струму КЗ для довільного моменту часу від автономних джерел електроенергії радіальної схеми вмикання, а також від синхронних двигунів розраховують за допомогою відповідних типових кривих.

12. Типові криві характеризують зміну відносних значень (до початкового значення складової) даної складової в часі за різних значень *електричної віддаленості* від точки КЗ.

13. Електричну віддаленість від точки КЗ синхронного двигуна оцінюють відношенням діючого значення періодичної складової струму у початковий момент часу виникнення КЗ до її номінального струму.

14. Висока точність оцінки струмів короткого замикання не може бути досягнута у зв'язку з неповнотою і некоректністю вихідної інформації, а також похибкою методів розрахунку.

Тестові питання по темі 10

1. Які особливості мереж до 1 кВ?
2. Чому періодична складова струму короткого замикання в мережі до 1 кВ вважається незмінною?
3. Які враховуються параметри елементів схеми електропостачання з напругою до 1 кВ?
4. Сформувати розрахункові умови в мережах до 1 кВ.
5. Пояснити розрахунок параметрів силових трансформаторів.
6. Як розраховують параметри шин і струмопроводів шин?
7. Як розраховують параметри повітряних та кабельних ліній?
8. Як розраховують параметри трансформаторів струму, комутаційних апаратів та реле?
9. Як врахувати параметри дуги в місці короткого замикання, конденсаторних батарей?
10. Як враховують активні складові електричних опорів елементів апаратури, контактів дуги в місці короткого замикання?
11. Як враховують параметри синхронних та асинхронних двигунів?
12. Як здійснюють розрахунок струму короткого замикання в мережах до 1 кВ (енергосистема, двигуни).
13. Пояснити типові криві для синхронних та асинхронних двигунів (розрахунок КЗ).
14. Розрахунок ударного струму в мережах до 1 кВ.
15. Пояснити залежності зміни ударного коефіцієнта в мережах до 1 кВ.
16. Як здійснюється розрахунок струму короткого замикання для довільного моменту часу від синхронних двигунів?
17. Як здійснюється розрахунок струму короткого замикання для довільного моменту часу від асинхронних двигунів?
18. Як визначається віддаленість точки короткого замикання в мережах до 1 кВ?
19. Як оцінити похибку розрахунків струмів короткого замикання?
20. Які основні принципи використання програмних засобів для розрахунку струмів короткого замикання?

ТЕМА 11

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ У ТРИФАЗНІЙ МЕРЕЖІ

Загальні положення

У системі електропостачання за трифазного КЗ усі фази мережі – в однакових умовах. Вектори періодичних складових струмів та напруг фаз відповідно рівні за значенням модуля і зміщені у просторі на 120° , утворюючи *зрівноважені системи*. Тому еквівалентну схему заміщення короткозамкненого трифазного контура подають в однолінійному зображенні й розраховують лише одну з фаз.

Через появу пошкоджень (*несиметричні КЗ, обриви або несиметричне навантаження фаз*) модулі фазних струмів і напруг, а також кути їх взаємного зміщення стають різними за значеннями. Вектори фазних струмів та напруг утворюють несиметричні та загалом невірноважені системи. Розрахунки при цьому слід здійснювати із складанням схем заміщення для всіх трьох фаз з урахуванням *взаємоіндукції між ними*. Кількість необхідних для їх опису рівнянь значно зростає, трудомісткість та обсяг обчислень (навіть за умови простої схеми СЕП) збільшуються.

Розглянемо перехідні процеси, зумовлені одноразовою несиметрією, тобто виникненням несиметричного пошкодження лише в одному місці мережі електричної системи, у той час як загалом вона залишається симетричною. Така одноразова несиметрія може бути *поперечною (будь-який вид несиметричних КЗ)* чи *поздовжньою (розрив однієї або двох фаз чи неоднаковий опір навантаження фаз трифазної мережі)*.

Аналіз перехідних процесів при несиметричних пошкодженнях істотно утруднений тим, що у мережах з синхронними машинами в останніх утворюється *пульсуюче магнітне поле ротора*, яке викликає, як показано далі, повний спектр вищих гармонік. Перехід від фазних змінних до змінних у координатах d, q при цьому не звільняє диференціальні рівняння опису таких процесів від *періодичних коефіцієнтів*. Для стаціонарних умов переважно визначають лише основні гармоніки шуканих фізичних величин. Саме за такого обмеження можливе застосування методу симетричних складових для мереж з синхронними машинами. Розрахунки роблять для трьох однолінійних взаємно незалежних схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей, до яких еквівалентують синхронні машини з відповідними параметрами.

Синхронний генератор вищих гармонік

Кожна непарна гармоніка однофазного струму КЗ в обмотці статора викликає чергову парну гармоніку струму в *обмотці ротора*, а кожна парна в обмотці ротора – непарну гармоніку струму в *обмотці статора*.

Струм незмінного напрямку та парні гармоніки струму в обмотці статора створюють основну та непарні гармоніки струму в обмотці ротора і навпаки.

В обмотці статора генератора формується увесь спектр *вищих гармонік струму*. При відсутності ємності у колі обмотки статора амплітуди гармонік струму із зростанням їх порядкового номера зменшуються. Ця теоретично нескінченна низка гармонік струму виникає тому, що за несиметричного КЗ утворюється не обертове магнітне поле, а пульсуюче.

Електромагнітний вплив демпферних обмоток такий же, як і обмоток збудження. Поперечна демпферна обмотка та обмотки, розміщені поздовжньою віссю ротора синхронної машини, зміщені у просторі на 90 ел. град. Кожна з цих обмоток створює свій пульсуючий потік. Ці потоки у просторі зміщені на 90°, а у часі – на чверть періоду. Внаслідок їх спільної взаємодії утворюється обертове колове поле, яке відносно магнітного потоку статора, що викликав його, залишається нерухомим і спрямованим назустріч. Отже, коли ротор симетричний у поперечній та поздовжній осях, пульсуюче магнітне поле відсутнє. Насправді ж ротор синхронної машини не має такої симетрії. Тому за будь-якого виду несиметричного навантаження в її обмотках виникають вищі гармоніки струмів, амплітуда яких тим вища, чим більша несиметрія конструкції ротора. Тому у гідрогенераторів присутність вищих гармонік струму помітна, а в турбогенераторів практично не відчувається.

Метод симетричних складових

Метод дає можливість подати будь-яку несиметричну систему з трьох векторів у вигляді складових симетричних систем векторів: прямої, зворотної та нульової послідовностей. У кожній з систем векторів окремих послідовностей явища у фазах подібні, що дозволяє користуватися однолінійними схемами заміщення для кожної послідовності та розраховувати одну з фаз. Вибирається фаза (так звана *особлива*), у відмітних від двох інших умовах.

Основні положення методу

• Будь-який з трьох векторів симетричної системи можна виразити однойменним вектором іншої фази з використанням оператора повороту a (передається комплексним числом $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$) і таких співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ}; \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = 1; \\ a^4 &= a; \\ a^2 + a + 1 &= 0; \\ a^2 - a &= \sqrt{3} e^{-j90^\circ} = -j\sqrt{3}; \\ a - a^2 &= j\sqrt{3}; \\ 1 - a &= \sqrt{3} e^{-j30^\circ} = 1\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \\ 1 - a^2 &= \sqrt{3} e^{j30^\circ} = 1\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (11.1)$$

У симетричній трифазній системі векторів (рис. 11.1) кожен з них можна подати:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= a\dot{N}_B = a^2\dot{N}_C; \\ \dot{N}_B &= a\dot{N}_C = a^2\dot{N}_A; \\ \dot{N}_C &= a\dot{N}_A = a^2\dot{N}_B. \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

Множення вектора на оператор a означає його поворот на 120° у позитивному напрямку (*проти руху годинникової стрілки*). Множення на a^2 відповідає повороту на 240° у тому ж напрямку або на 120° – у *протилежному*.

• Несиметричну систему з трьох векторів можна розкласти на складові:

– *прямої послідовності* (індекс 1) – з трьох рівних за модулем векторів, що зсунуті відносно один одного на 120° та чергуються, як і в основній симетричній системі (рис. 11.2, а);

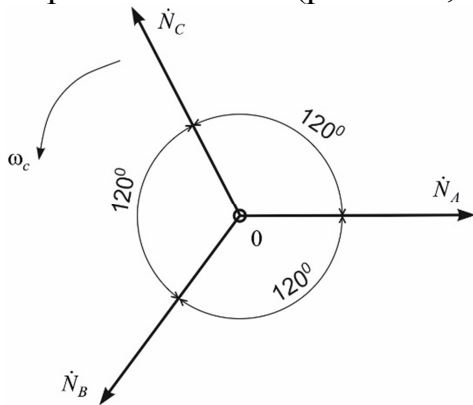


Рис. 11.1. Симетрична трифазна система фазних векторів параметра режиму

– *зворотної послідовності* (індекс 2) – також з трьох рівних за модулем векторів, зсунутих відносно один одного на 120° . Чергування цих векторів протилежне основній симетричній системі (рис. 11.2, б). Оскільки сума векторів прямої (*зворотної*) послідовності дорівнює нулю, ці системи векторів сприймають як зрівноважені:

$$\dot{N}_{A1} + \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{C1} = \dot{N}_{A1}(1 + a^2 + a) = 0; \quad (11.3)$$

$$\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{C2} = \dot{N}_{A2}(1 + a + a^2) = 0;$$

– *нульової послідовності* – з трьома рівними за модулем векторами, що збігаються і за напрямком (рис. 11.2, в) та позначаються індексом 0. Система векторів цієї послідовності симетрична, але невірноважена:

$$\dot{N}_{A0} + \dot{N}_{B0} + \dot{N}_{C0} = 3\dot{N}_{A0} \neq 0. \quad (11.4)$$

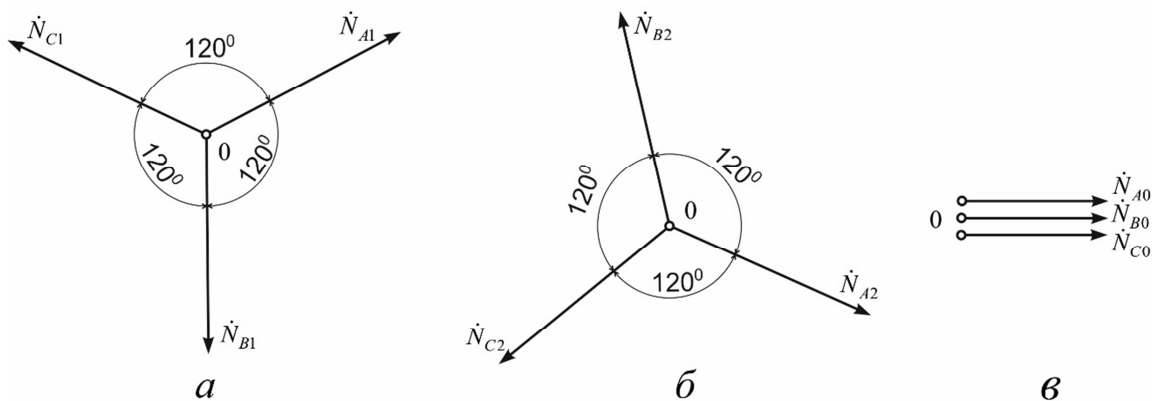


Рис. 11.2. Складові симетричні системи фазних векторів послідовностей: а – прямої; б – зворотної; в – нульової

За складовими (*векторами прямої, зворотної та нульової послідовностей*) можна відновити первинну несиметричну систему векторів:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_B &= \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{B0}; \\ \dot{N}_C &= \dot{N}_{C1} + \dot{N}_{C2} + \dot{N}_{C0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.5)$$

Якщо за особливу взяти фазу A , то з урахуванням залежності 11.2 та рис. 11.2 систему рівнянь (11.5) запишемо через симетричні складові вектора особливої фази:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_B &= a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_C &= a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.6)$$

• Рівняння (11.6) дають змогу виділити з несиметричної системи векторів їх симетричні складові, для чого слід скласти всі рівняння, попередньо вирівнявши коефіцієнти при шуканій складовій (табл. 11.1). Наприклад, щоб виділити складову (вектор прямої послідовності), достатньо рівняння (11.6) помножити на коефіцієнти $1, a, a^2$ відповідно, а потім скласти.

Таблиця 11.1

Коефіцієнти для виділення симетричних складових

Рівняння несиметричної системи векторів	Послідовність		
	пряма	зворотна	нульова
$\dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	1	1	1
$\dot{N}_B = a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	1	a^2	1
$\dot{N}_C = a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	a^2	a	1

Складові вектори $\dot{N}_{A1}, \dot{N}_{A2}, \dot{N}_{A0}$ отримаємо через фазні $\dot{N}_A, \dot{N}_B, \dot{N}_C$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a\dot{N}_B + a^2\dot{N}_C); \\ \dot{N}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a^2\dot{N}_B + a\dot{N}_C); \\ \dot{N}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C). \end{aligned} \right\} \quad (11.7)$$

Це формули розкладання несиметричної системи векторів $\dot{N}_A, \dot{N}_B, \dot{N}_C$ на три симетричні складові векторів особливої фази $\dot{N}_{A1}, \dot{N}_{A2}, \dot{N}_{A0}$.

На рис. 11.3 графічно визначені складові $\dot{N}_{A1}, \dot{N}_{A2}, \dot{N}_{A0}$ системи векторів $\dot{N}_A, \dot{N}_B, \dot{N}_C$.

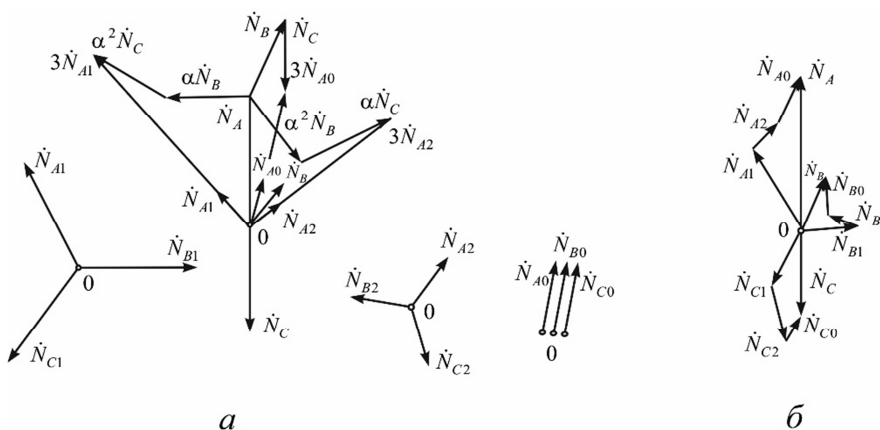


Рис. 11.3. Розкладання несиметричної трифазної системи векторів параметра режиму

Опір елементів зворотної та нульової послідовностей

Усі опори, якими характеризуються окремі елементи у нормальному симетричному режимі, – прямої послідовності. Для елемента, магнітозв'язані кола якого нерухомі відносно один одного, опір прямої та зворотної послідовностей однаковий за значенням, оскільки від зміни порядку чергування фаз симетричної трифазної системи взаємоіндукція між фазами елемента не змінюється. Отже, для трансформаторів, автотрансформаторів, ПЛ, КЛ та реакторів:

$$r_2 = r_1, x_2 = x_1. \quad (11.8)$$

Реактивний опір зворотної послідовності елементів з обертовими магнітозв'язаними колами (синхронні генератори, компенсатори, двигуни) залежить від конструкції машини (симетрії ротора). Струм зворотної послідовності утворює магнітний потік, що переміщується відносно ротора з подвійною синхронною швидкістю у зворотному напрямку. Під час переміщення цей потік, по черзі поєднуючись то з поздовжньою, то поперечною віссю ротора, зустрічає на своєму шляху магнітний опір, що безперервно змінюється.

Якщо повітряний зазор по всьому колу розточки машини однаковий і ротор симетричний, то в своєму переміщенні магнітний потік зворотної послідовності скрізь зустрічає однаковий опір, як і магнітний потік прямої послідовності. Для машин з неявнополюсним ротором (турбогенератори), де:

$$x'_d = x'_q \text{ та } x''_d = x''_q, \quad (11.9)$$

опір зворотної послідовності мало *різниться* від опору прямої послідовності:

$$x_2 \cong x'_d \text{ або } x_2 \cong x''_d. \quad (11.10)$$

Перший вираз справедливий для машин *без демпферних обмоток*, а другий – з ними. Для машин з явнополюсним ротором у разі живлення від джерела необмеженої потужності опір зворотної послідовності береться рівним аналогічно.

Як наближені співвідношення:

$$x_2 \approx 1,45x'_d \text{ чи } x_2 \approx 1,45x''_d \quad (11.11)$$

Струм нульової послідовності створює лише магнітний потік розсіяння статорної обмотки, який менший струму прямої (зворотної) послідовності; причому це зменшення помітно залежить від типу обмотки, тому значення x_0 синхронних машин коливається у широких межах:

$$x_0 = (0,15 \dots 0,6)x'_d \text{ або } x_0 = (0,15 \dots 0,6)x'_q. \quad (11.12)$$

В асинхронного двигуна, що працює з ковзанням S у нормальному режимі, відносно магнітного потоку зворотної послідовності – ковзання $2-s$. Отже, опір зворотної послідовності x_2 являє собою опір при ковзанні $2-s$. Опір зворотної послідовності практично дорівнює опорів короткого замикання (при нерухомому роторі):

$$x_{2-s} \approx x_{s=1} = x_k, \quad (11.13)$$

відносно значення якого близьке до значення (залежність 11.14):

$$x_{*2} \approx 1/I_{*нукс}, \quad (11.14)$$

де $I_{*нук}$ – каталожне значення кратності пускового струму двигуна стосовно його номінального струму.

Реактивний опір нульової послідовності асинхронного двигуна визначається потоком розсіяння статорної обмотки і значною мірою залежить від типу та конструкції останньої. Він встановлюється за даними заводу-виготовлювача або експериментально.

Реактивний опір зворотної послідовності у вузлі узагальненого навантаження залежить від складу приймачів електричної енергії та відносної частки кожного з них у формуванні навантаження. При відомому складі споживачів у вузлі навантаження опір зворотної послідовності елементів комплексного навантаження слід брати за даними, звертаючись до рекомендованого Вам підручника. Для середнього типового промислового навантаження можна вважати, що його основна частка – асинхронні двигуни, реактивний опір зворотної послідовності яких практично такий же, як і в початковий момент часу раптового порушення режиму:

$$x_{*2} = x_{*1} = 0,35. \quad (11.15)$$

Опір нульової послідовності узагальненого навантаження визначається в основному розподільною мережею та знижувальними трансформаторами. У схемах заміщення нульової послідовності враховують лише знижувальні трансформатори із заземленою нейтраллю (увімкнені до мережі напругою 110 кВ і вище). Основні навантаження працюють, як правило, з ізольованою нейтраллю, тому кола для циркуляції струму нульової послідовності тут відсутні; можна вважати, що реактивний опір нульової послідовності навантажень дорівнює $x_0 \rightarrow +\infty$.

Опір нульової послідовності трансформаторів визначається конструкцією, схемою з'єднання обмоток, станом нейтралі. Опір нульової послідовності трансформаторів з боку обмотки, з'єднаної на трикутник або зірку з незаземленою нульовою точкою, незалежно від схеми з'єднання інших обмоток нескінченно великий ($x_0 \equiv \infty$).

Опір нульової послідовності трансформатора буде кінцевим ($x_0 \neq \infty$) тільки з боку його обмотки, з'єднаної на зірку із заземленою нейтраллю і його значення залежить від схеми з'єднання інших обмоток та наявності в них електричного кола для перебігу струму нульової послідовності. Детально – дивись підручник (розділ 6).

Повітряними лініями струм нульової послідовності циркулює струмоведучими провідниками, заземленими колами (грозозахисні троси, рейкові колії вздовж лінії) та землею. Основні труднощі обчислення значення опору нульової послідовності – в обліку розподілу струму в землі.

Для кабельних ліній опір прямої (зворотної) послідовності можна визначити так само, як і для повітряної лінії. Індуктивний опір кабельних ліній значно менший індуктивного повітряної лінії через менші відстані між фазами. Ємнісна провідність кабельних ліній більша, ніж повітряних, що зумовлене меншими відстанями та високим значенням діелектричної провідності ізоляції.

Оболонка кабелю, як правило, заземлена на його кінцях та муфтах. Для перебігу струму нульової послідовності вона утворює вітки, паралельні землі. У цьому відношенні вплив оболонки кабелю аналогічний заземленим тросам повітряної лінії. На розподіл струму між оболонкою та землею істотно впливає *не лише власний опір оболонки*, а й опір її заземлень, значення яких залежать від прокладки кабелю (траншея, блоки і т.п.).

В інженерних розрахунках для трижильних кабелів беруть $r_0 \approx 10r_1$; $x_0 = (3,5 \dots 4,6)x_1$, а для одножильних:

$$x_0 = (0,8 \dots 1,0)x_1 . \quad (11.16)$$

Схеми заміщення для послідовностей

Під час розрахунку будь-якого режиму з несиметричним пошкодженням початковим етапом вважається складання схем заміщення, а у загальному випадку – для всіх послідовностей: прямої, зворотної та нульової. Схеми заміщення окремих послідовностей містять еквіваленти елементів мережі, якими при даній несиметрії перебігає струм відповідної послідовності. Параметри еквівалентів схем заміщення окремих послідовностей відображають, звівши їх відповідно до напруги основного ступеня або базисних умов в іменованих чи відносних одиницях виміру. При аналітичному вирішенні завдання за цими схемами знаходять результуючий опір кожної послідовності відносно місця, де сталася несиметрія. Для схеми заміщення прямої послідовності виявляють також результуючу е.р.с.

Схема заміщення для прямої послідовності повинна містити еквіваленти всіх елементів розрахункової схеми електроустановки, якими перебігає струм прямої послідовності. Синхронні генератори, компенсатори і синхронні та асинхронні електродвигуни, які належить урахувати, під час обчислення початкового значення струму несиметричного КЗ вводять до схеми заміщення прямої послідовності надперехідними е.р.с. і опорами. Решту елементів подають до схеми заміщення у вигляді тільки електричних опорів.

Схема заміщення для зворотної послідовності за структурою аналогічна схемі заміщення для прямої послідовності, оскільки *струми прямої та зворотної послідовностей перебігають одними й тими ж шляхами*. Щоб отримати схему заміщення зворотної послідовності, треба перетворити схему заміщення прямої послідовності – е.р.с. усіх генеруючих джерел взяти рівними нулю, а індуктивний опір синхронних машин та навантажень замінити індуктивним опором зворотної послідовності цих елементів. У спрощених практичних розрахунках допускається брати рівність опорів елементів у схемах прямої та зворотної послідовностей.

Початком схеми заміщення для зворотної послідовності вважають точку нульового потенціалу всіх генеруючих та навантажувальних віток. Кінцем схеми заміщення для зворотної послідовності визнають точку, де виникла зазначена несиметрія. До кінця схем заміщення прикладені напруги відповідних послідовностей.

Схема заміщення для нульової послідовності відрізняється від схем заміщення інших послідовностей, адже струм нульової послідовності перебігає шляхами, відмітними від шляхів перебігу струмів симетричних режимів. Тому схема заміщення для нульової послідовності значною мірою визначається схемами з'єднання обмоток трансформаторів та автотрансформаторів і станом їх нейтралей.

Складання названої схеми заміщення розпочинають від точки, де виникла несиметрія, вважаючи, що саме в ній прикладена напруга нульової послідовності. Залежно від виду несиметрії цю напругу прикладають відносно землі (поперечна несиметрія) або послідовно у точку розсічення фазних проводів (поздовжня несиметрія). Далі у межах кожного електрично зв'язаного кола виявляють можливі шляхи циркуляції струмів нульової послідовності.

Джерело напруги нульової послідовності \dot{U}_{k0} ввімкнено відносно землі у місці пошкодження. У разі відсутності ємнісної провідності на землю для циркуляції струму нульової послідовності необхідна щонайменше одна заземлена нейтраль у тому ж електрично зв'язаному колі. При кількох заземлених нейтралях у цьому колі утворюються відповідно паралельні контури циркуляції струму нульової послідовності.

Внаслідок поздовжньої несиметрії, коли напруга нульової послідовності введена у фазні проводи послідовно, циркуляція струму нульової послідовності можлива навіть при відсутності заземлених нейтралей, якщо існує контур його перебігу. З відсутністю такого контуру перебіг струму нульової послідовності у зазначених умовах тоді можливий, коли в тому ж електрично зв'язаному колі існують заземлені нейтралі з обох боків місця прикладання напруги нульової послідовності $\Delta \dot{U}_{L0}$.

Результуючий опір схем заміщення

При розрахунку режимів з несиметричними пошкодженнями результуючий опір схем заміщення для окремих послідовностей визначають відносно місця виникнення несиметрії. Схеми заміщення перетворюють за вищевикладеними рекомендаціями. Треба мати на увазі принципову відмінність у *перетворенні схем заміщення за поперечної та поздовжньої несиметріями*.

Співвідношення між значеннями результуючих опорів однойменної послідовності при поперечній та поздовжній несиметриях в одній і тій же точці можуть бути найрізноманітнішими залежно від характеру, місця несиметрії та інших чинників.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. У системі електропостачання за трифазного КЗ усі фази мережі – в однакових умовах.
2. Еквівалентну схему заміщення короткозамкненого трифазного контура подають в однолінійному зображенні й розраховують лише одну з фаз.
3. Через появу пошкоджень (*несиметричні КЗ, обриви або несиметричне навантаження фаз*) модулі фазних струмів і напруг, а також кути їх взаємного зміщення стають різними за значеннями.

4. Одноразова несиметрія може бути *поперечною* (будь-який вид несиметричних КЗ) чи *поздовжньою* (розрив однієї або двох фаз чи *неоднаковий опір навантаження фаз трифазної мережі*).

5. Розрахунки роблять для трьох однолінійних взаємно незалежних схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.

6. Метод дає можливість подати будь-яку несиметричну систему з трьох векторів у вигляді складових симетричних систем векторів: прямої, зворотної та нульової послідовностей.

7. У кожній з систем векторів окремих послідовностей явища у фазах подібні, що дозволяє користуватися однолінійними схемами заміщення для кожної послідовності та розраховувати одну з фаз.

8. Усі опори, якими характеризуються окремі елементи у нормальному симетричному режимі, – прямої послідовності.

9. Для елемента, магнітозв'язані кола якого нерухомі відносно один одного, опір прямої та зворотної послідовностей однаковий за значенням.

10. Реактивний опір зворотної послідовності елементів з обертовими магнітозв'язаними колами (синхронні генератори, компенсатори, двигуни) залежить від конструкції машини.

11. Струм нульової послідовності створює лише магнітний потік розсіяння статорної обмотки, який менший струму прямої (зворотної) послідовності.

12. Реактивний опір нульової послідовності асинхронного двигуна визначається потоком розсіяння статорної обмотки і значною мірою залежить від типу та конструкції останньої.

13. Реактивний опір зворотної послідовності у вузлі узагальненого навантаження залежить від складу приймачів електричної енергії.

14. Опір нульової послідовності узагальненого навантаження визначається в основному розподільною мережею та знижувальними трансформаторами.

15. Опір нульової послідовності трансформаторів визначається конструкцією, схемою з'єднання обмоток, станом нейтралі.

16. Повітряними лініями струм нульової послідовності циркулює струмоведучими провідниками, заземленими колами (грозозахисні троси, рейкові колії вздовж лінії) та землею.

17. Схеми заміщення окремих послідовностей містять еквіваленти елементів мережі, якими при даній несиметрії перебігає струм відповідної послідовності. Знаходять результуючий опір кожної послідовності відносно місця, де сталася несиметрія.

18. *Схема заміщення для прямої послідовності* повинна містити еквіваленти всіх елементів розрахункової схеми електроустановки, якими перебігає струм прямої послідовності.

19. *Схема заміщення для зворотної послідовності* за структурою аналогічна схемі заміщення для прямої послідовності.

20. *Струми прямої та зворотної послідовностей перебігають одними й тими ж шляхами.*

21. У спрощених практичних розрахунках допускається брати рівність опорів елементів у схемах прямої та зворотної послідовностей.

22. *Схема заміщення для нульової послідовності* ризниться від схем заміщення інших послідовностей.

23. Струм нульової послідовності перебігає шляхами, відмітними від шляхів перебігу струмів симетричних режимів.

24. Результуючий опір схем заміщення для окремих послідовностей визначають відносно місця виникнення несиметрії. Існує принципова відмінність у *перетворенні схем заміщення* за поперечної та *поздовжньої несиметріями*.

Тестові питання по темі 11

1. Основні позитивні властивості методу симетричних складових?
2. Чому режими з несиметричними пошкодженнями можна розраховувати за однією (особливою) фазою?
3. Суть основних положень методу симетричних складових.
4. У чому суть розрахунку режимів з несиметричними пошкодженнями за методом симетричних складових?
5. Як розкласти систему несиметричних векторів на три симетричні системи?
6. Як за довільно побудованими симетричними системами векторів (прямою, зворотною та нульовою послідовностями) отримати несиметричну систему?
7. Як установити опір прямої, зворотної та нульової послідовностей елементів короткозамкненого кола?
8. Чому опір зворотної послідовності обертових машин ризниться від опору прямої послідовності?
9. Чому для одного й того ж елемента різні значення опору прямої Z_1 , зворотної Z_2 та нульової Z_0 послідовностей?
10. У чому полягає вплив грозозахисного троса на опір нульової послідовності повітряної лінії?
11. Схеми заміщення для різних послідовностей короткозамкненого кола при несиметричних КЗ.
12. Як формуються схеми заміщення для різних послідовностей?
13. Особливості схеми заміщення для нульової послідовності.
14. Результуючий опір схем заміщення для окремих послідовностей.
15. Загальні принципи оцінки перехідних процесів при порушенні симетрії у трифазній мережі.

ТЕМА 12

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ ПОПЕРЕЧНОЇ НЕСИМЕТРІЇ

Загальні положення

Під час розрахунку одноразової поперечної несиметрії за методом симетричних складових співвідношення між симетричними складовими струмів та напруг окремих послідовностей для особливої фази A , відповідно до залежностей (тема 11), можуть бути подані системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - \underline{Z}_{1\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A1}; \\ \dot{U}_{\kappa A2} &= 0 - \underline{Z}_{2\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A2}; \\ \dot{U}_{\kappa A0} &= 0 - \underline{Z}_{0\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A0}. \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

Система (12.1) містить шість невідомих $\dot{I}_{\kappa A1}$; $\dot{I}_{\kappa A2}$; $\dot{I}_{\kappa A0}$; $\dot{U}_{\kappa A1}$; $\dot{U}_{\kappa A2}$; $\dot{U}_{\kappa A0}$. Для їх визначення необхідно додатково скласти ще три рівняння на основі граничних умов, що характеризують конкретний вид несиметрії.

Розрахункова схема зазначеної вище несиметрії у довільному місці трифазної електричної мережі загалом зображується як приєднання у цьому місці відгалуження з неоднакових опорів у фазах. Коли фази A , B та C замикаються між собою опорами \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C та на землю через загальний опір \underline{Z} , то з такої моделі можна отримати несиметричне коротке замикання будь-якого виду, вважаючи значення частини опорів рівними нулю або нескінченними.

Розглянемо основні види несиметричних коротких замикань: *однофазне*, *двофазне* та *двофазне на землю*. Крім припущень, зазначених у темі 11, додатково вважаємо:

- в усіх випадках відбувається “металеве” коротке замикання;
- схеми заміщення для окремих послідовностей еквівалентні відносно місця короткого замикання (визначені результуючі е.р.с. $\dot{E}_{A\Sigma}$ та опори $\underline{Z}_{1\text{pez}}$, $\underline{Z}_{2\text{pez}}$, $\underline{Z}_{0\text{pez}}$);
- під час запису граничних умов фаза A – особлива;
- за позитивний обрано напрямок струмів до місця КЗ (*фазних струмів і симетричних складових*);
- для спрощення запису індекс виду КЗ збережений лише в граничних умовах та остаточних результатах.

Фазні напруги та струми через симетричні складові особливої фази знаходять за виразами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A} &= \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}; \\ \dot{U}_{\kappa B} &= a^2 \dot{U}_{\kappa A1} + a \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}; \\ \dot{U}_{\kappa C} &= a \dot{U}_{\kappa A1} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}; \end{aligned} \right\} \quad (12.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A} &= \dot{I}_{\kappa A1} + \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0}; \\ \dot{I}_{\kappa B} &= a^2 \dot{I}_{\kappa A1} + a \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0}; \\ \dot{I}_{\kappa C} &= a \dot{I}_{\kappa A1} + a^2 \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0}; \end{aligned} \right\} \quad (12.3)$$

де для фаз B та C симетричні складові струмів і напруг визначені за допомогою оператора повороту a .

Однофазне коротке замикання

Граничним умовам при однофазному КЗ відповідає розрахункова схема Рис. 12.1,а, що утворюється за умови, коли значення опорів: Z_A рівне нулю, а Z_B і Z_C – нескінченності. З використанням фазних напруг і струмів *граничні умови* запишемо як:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A}^{(1)} &= 0; \\ \dot{I}_{\kappa B}^{(1)} &= 0; \\ \dot{I}_{\kappa C}^{(1)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.4)$$

Перетворимо залежність 12.4 через симетричні складові особливої фази A за рівняннями (12.2) та (12.3):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A} &= \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{I}_{\kappa B} &= a^2 \dot{I}_{\kappa A1} + a \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{I}_{\kappa C} &= a \dot{I}_{\kappa A1} + a^2 \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.5)$$

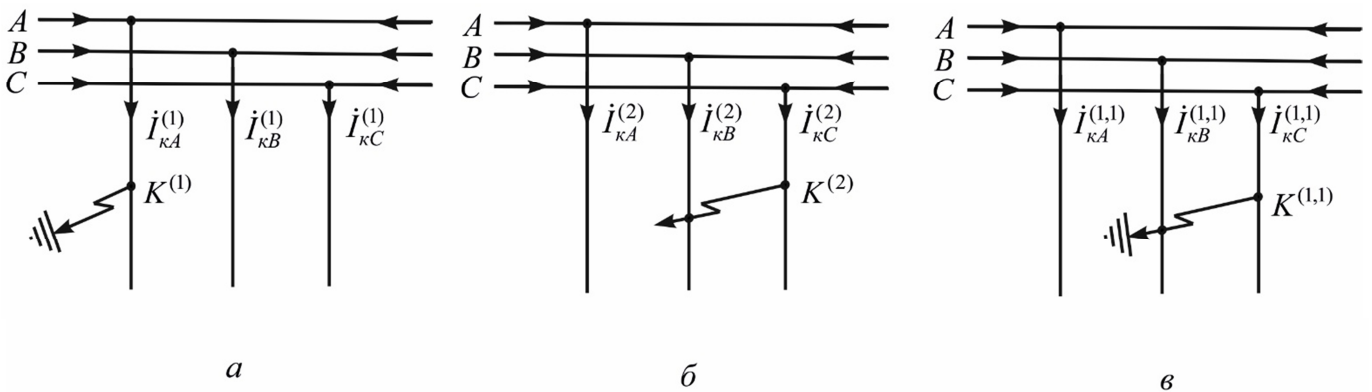


Рис. 12.1. Розрахункові схеми несиметричного короткого замикання:
а – однофазного; б – двофазного; в – двофазного на землю

Розв'язуючи рівняння залежності 12.1 разом з отриманими рівняннями залежності 12.5, визначимо струми та напруги окремих послідовностей. Підставимо $\dot{U}_{\kappa A1}$, $\dot{U}_{\kappa A2}$, $\dot{U}_{\kappa A0}$ із залежності 12.1 у рівняння залежності 12.5 для $\dot{U}_{\kappa A}$ і матимемо систему з трьох рівнянь відносно струмів окремих послідовностей:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{1\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A1} + \underline{Z}_{2\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A2} + \underline{Z}_{0\text{pez}} \dot{I}_{\kappa A0} &= \dot{E}_{A\Sigma}; \\ a^2 \dot{I}_{\kappa A1} + a \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} &= 0; \\ a \dot{I}_{\kappa A1} + a^2 \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.6)$$

Тоді маємо:

$$\dot{I}_{\kappa A1}^{(1)} = \dot{I}_{\kappa A2}^{(1)} = \dot{I}_{\kappa A0}^{(1)} = \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1\text{pez}} + \underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}). \quad (12.7)$$

Симетричні складові напруг особливої фази A у місці КЗ знаходимо за залежністю 12.1 формулу:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A1}^{(1)} &= \dot{E}_{A\Sigma} - \underline{Z}_{1\text{pez}} \dot{i}_{\kappa A1}^{(1)} = (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}) \dot{i}_{\kappa A1}^{(1)}; \\ \dot{U}_{\kappa A2}^{(1)} &= -\underline{Z}_{2\text{pez}} \dot{i}_{\kappa A2}^{(1)}; \\ \dot{U}_{\kappa A0}^{(1)} &= -\underline{Z}_{0\text{pez}} \dot{i}_{\kappa A0}^{(1)}. \end{aligned} \right\} \quad (12.8)$$

Струми та напруги фаз у місці КЗ можна розрахувати аналітично, використавши рівняння (12.2) та (12.4),

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{\kappa A}^{(1)} &= 3\dot{i}_{\kappa A1}^{(1)}; \\ \dot{i}_{\kappa B}^{(1)} &= 0; \\ \dot{i}_{\kappa C}^{(1)} &= 0; \\ \dot{U}_{\kappa A}^{(1)} &= 0; \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(1)} &= [(a^2 - a)\underline{Z}_{2\text{pez}} + (a^2 - 1)\underline{Z}_{0\text{pez}}] \cdot \dot{i}_{\kappa A1}^{(1)}; \\ \dot{U}_{\kappa C}^{(1)} &= [(a - a^2)\underline{Z}_{2\text{pez}} + (1 - a^2)\underline{Z}_{0\text{pez}}] \cdot \dot{i}_{\kappa A1}^{(1)}. \end{aligned} \right\} \quad (12.9)$$

Коефіцієнт пропорційності, що сполучає струми фазний та прямої послідовності (для особливої фази A):

$$m^{(1)} = \dot{i}_{\kappa A}^{(1)} / \dot{i}_{\kappa A1}^{(1)} = 3. \quad (12.10)$$

Фазні струми та напруги після розрахунку симетричних складових особливої фази A можна також знайти графічно, побудувавши у масштабі відповідні векторні діаграми (при побудові індекс “ κ ” в усіх векторах випускаємо). Побудуємо векторну діаграму струмів:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A\Sigma} &= jU_{A\Sigma}; & \underline{Z}_{1\text{pez}} &= jx_{1\text{pez}}; \\ \underline{Z}_{2\text{pez}} &= jx_{2\text{pez}}; & \underline{Z}_{0\text{pez}} &= jx_{0\text{pez}}. \end{aligned} \quad (12.11)$$

Тоді:

$$\dot{i}_{\kappa A1} = I_{\kappa A1}, \text{ а } \dot{U}_{\kappa A1} = jU_{\kappa A1}. \quad (12.12)$$

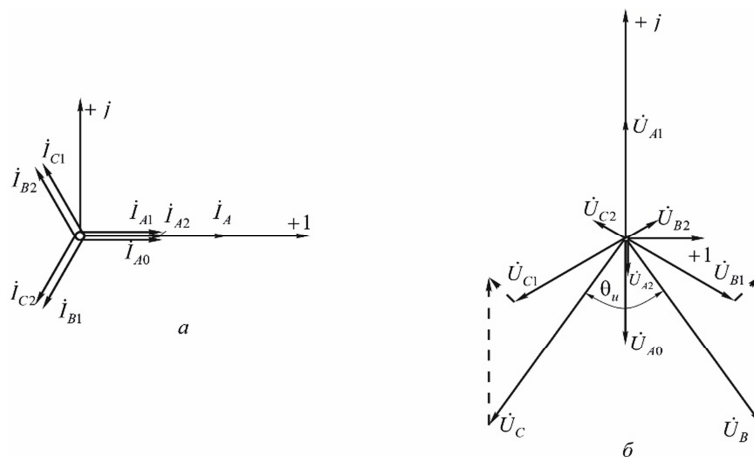


Рис. 12.2. Векторні діаграми фазних струмів (а) і напруг (б) та їх симетричних складових у місці однофазного КЗ

По осі дійсних чисел комплексної площини відкладаємо три паралельні однакові вектори $\dot{I}_{\kappa A1}, \dot{I}_{\kappa A2}, \dot{I}_{\kappa A0}$. Підсумовуючи пофазно вектори окремих послідовностей, отримуємо векторну діаграму фазних струмів (рис. 12.2, а). Аналогічно побудуємо векторну діаграму напруг (рис. 12.2, б). Кут θ_U між напругами непошкоджених фаз (однофазне коротке замикання) залежить від співвідношення x_{2pez} та x_{0pez} й може змінюватися у межах $\pi/3 \leq \theta_U \leq \pi$. Якщо $x_{0pez} \rightarrow 0$, то кут $\theta_U \rightarrow 180^\circ$, а при $x_{0pez} = \infty$ кут $\theta_U = 60^\circ$.

При однофазних КЗ на землю слід розрізняти напругу фази стосовно землі (фазна напруга) та напругу нульової точки системи векторів. Ці дві напруги різняться на складову напруги нульової послідовності. Якщо напруга нульової послідовності відсутня, то фазна напруга щодо нульової точки системи векторів – відносно землі також.

Двофазне коротке замикання

Розрахункову схему двофазного короткого замикання $K^{(2)}$ (рис. 12.1,б) отримаємо при значеннях опорів: \underline{Z}_A – нескінченності, а \underline{Z}_B та \underline{Z}_C – нулю. Граничні умови у фазних величинах:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A}^{(2)} &= 0; \\ \dot{I}_{\kappa B}^{(2)} &= -\dot{I}_{\kappa C}^{(2)}; \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(2)} &= \dot{U}_{\kappa C}^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (12.13)$$

Перетворимо граничні умови через симетричні складові особливої фази A за рівняннями (12.3) та (12.13):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A} &= \dot{I}_{\kappa A1} + \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} &= (a^2 + a)\dot{I}_{\kappa A1} + (a + a^2)\dot{I}_{\kappa A2} + 2\dot{I}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{U}_{\kappa B} - \dot{U}_{\kappa C} &= (a^2 - a)\dot{U}_{\kappa A1} + (a - a^2)\dot{U}_{\kappa A2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.14)$$

Розв'язуючи разом системи рівнянь (12.1) та (12.14), знайдемо струми і напруги окремих послідовностей особливої фази A у місці КЗ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A1} + \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} &= 0; \\ (a^2 + a)\dot{I}_{\kappa A1} + (a + a^2)\dot{I}_{\kappa A2} + 2\dot{I}_{\kappa A0} &= 0; \\ (a^2 - a)\underline{Z}_{1pez}\dot{I}_{\kappa A1} + (a - a^2)\underline{Z}_{2pez}\dot{I}_{\kappa A2} &= (a^2 - a)\dot{E}_{A\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (12.15)$$

Маємо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} &= \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1pez} + \underline{Z}_{2pez}); \\ \dot{I}_{\kappa A2}^{(2)} &= -\dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} = -\dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1pez} + \underline{Z}_{2pez}); \\ \dot{I}_{\kappa A0}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.16)$$

Напруги окремих послідовностей для особливої фази A у місці КЗ визначаємо за рівняннями (12.1):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} &= \underline{Z}_{1pez} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)}; \\ \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} &= -\underline{Z}_{2pez} \dot{I}_{\kappa A2}^{(2)} = \underline{Z}_{2pez} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)}; \\ \dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.17)$$

Під час визначення напруги $\dot{U}_{\kappa A0}^{(2)}$ слід урахувати, що у системах із заземленою нейтраллю (x_{0pez} має кінцеве значення) напруга $\dot{U}_{\kappa A0}^{(2)}$ при $\dot{I}_{\kappa A0}^{(2)} = 0$ на основі залежності 12.1 рівна нулю, а в системах з ізольованою нейтраллю ($\underline{Z}_{0pez} = \infty$) напруга $\dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} = -\infty$ та одне з рівнянь напруг вилучається.

Струми та напруги фаз з урахуванням залежностей 12.2, 12.3 та 12.13 (залежності 12.18 та 12.19):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A}^{(2)} &= 0; \\ \dot{I}_{\kappa B}^{(2)} &= a^2 \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} + a \dot{I}_{\kappa A2}^{(2)} = (a^2 - a) \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)}; \\ \dot{I}_{\kappa C}^{(2)} &= a \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} + a^2 \dot{I}_{\kappa A2}^{(2)} = (a - a^2) \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} = -\dot{I}_{\kappa B}^{(2)}; \end{aligned} \right\} \quad (12.18)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A}^{(2)} &= \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} = 2\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = 2\underline{Z}_{2pez} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)}; \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(2)} &= a^2 \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + a \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} = -\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)}; \\ \dot{U}_{\kappa C}^{(2)} &= a \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} = -\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa B1}^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (12.19)$$

Коефіцієнт пропорційності при двофазному замиканні між струмами пошкодженої фази та прямої послідовності особливої фази A у місці КЗ визначається:

$$m^{(2)} = \left| I_{\kappa B}^{(2)} / I_{\kappa A1}^{(2)} \right| = \sqrt{3}. \quad (12.20)$$

Векторні діаграми напруг та струмів у місці двофазного КЗ наведено на Рис. 12.3. Вони побудовані за умови, що електричний ланцюг еквівалентний індуктивним опорам, а е.р.с. $\dot{E}_{A\Sigma}$ спрямована віссю уявних чисел.

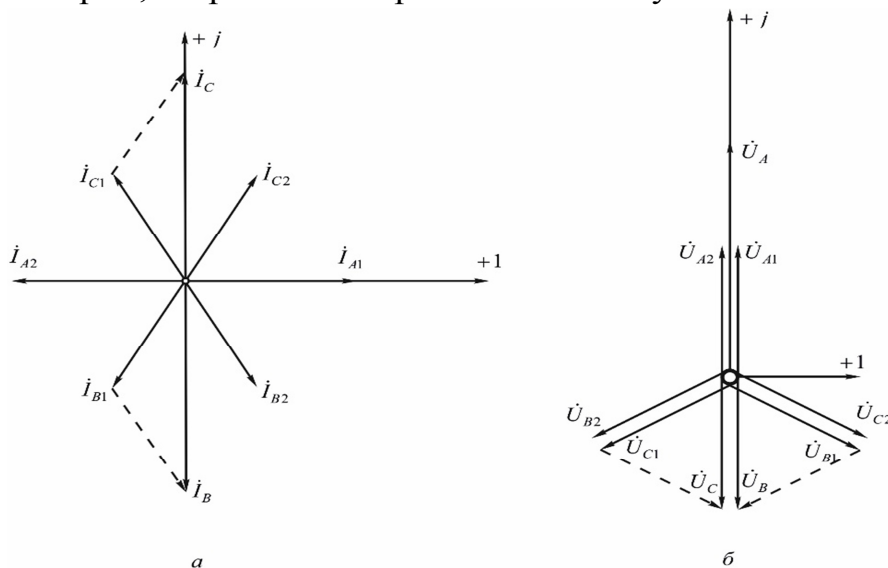


Рис. 12.3. Векторні діаграми фазних струмів (а) і напруг (б) та їх симетричних складових у місці двофазного КЗ

Двофазне коротке замикання на землю

Розрахункову схему двофазного короткого замикання на землю (рис. 12.1,в) отримуємо при значеннях опорів: \underline{Z}_A – нескінченності, а \underline{Z}_B та \underline{Z}_C – нулю. Схемі відповідають граничні умови у фазних величинах:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A}^{(1,1)} &= 0; \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(1,1)} &= \dot{U}_{\kappa C}^{(1,1)} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.21)$$

Виразимо їх симетричними складовими особливої фази A :

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A} &= \dot{I}_{\kappa A1} + \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{U}_{\kappa B} &= a^2 \dot{U}_{\kappa A1} + a \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 0; \\ \dot{U}_{\kappa C} &= a \dot{U}_{\kappa A1} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.22)$$

З рівнянь (12.1) визначимо $\dot{I}_{\kappa A1}$, $\dot{I}_{\kappa A2}$, $\dot{I}_{\kappa A0}$ та підставимо їх у залежність 12.22:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa A1} / \underline{Z}_{1\text{pez}} + \dot{U}_{\kappa A2} / \underline{Z}_{2\text{pez}} + \dot{U}_{\kappa A0} / \underline{Z}_{0\text{pez}} &= \dot{E}_{A\Sigma} / \underline{Z}_{1\text{pez}}; \\ a^2 \dot{U}_{\kappa A1} + a \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} &= 0; \\ a \dot{U}_{\kappa A1} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.23)$$

Визначимо струми прямої, зворотної та нульової послідовностей у місці КЗ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} &= \dot{E}_{A\Sigma} / \left[\underline{Z}_{1\text{pez}} + \underline{Z}_{2\text{pez}} \underline{Z}_{0\text{pez}} / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}) \right]; \\ \dot{I}_{\kappa A2}^{(1,1)} &= -\dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} \underline{Z}_{0\text{pez}} / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}); \\ \dot{I}_{\kappa A0}^{(1,1)} &= -\dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} \underline{Z}_{2\text{pez}} / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}). \end{aligned} \right\} \quad (12.24)$$

Використавши рівняння (12.2) та (12.3), обчислимо струми і напруги фаз:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\kappa A}^{(1,1)} &= 0; \\ \dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} &= \dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} \left[a^2 - (\underline{Z}_{2\text{pez}} + a \underline{Z}_{0\text{pez}}) / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}) \right]; \\ \dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} &= \dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} \left[a - (\underline{Z}_{2\text{pez}} + a^2 \underline{Z}_{0\text{pez}}) / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}) \right]; \\ \dot{U}_{\kappa A}^{(1,1)} &= 3 \dot{I}_{\kappa A1}^{(1,1)} \underline{Z}_{2\text{pez}} \underline{Z}_{0\text{pez}} / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}); \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(1,1)} &= 0; \\ \dot{U}_{\kappa C}^{(1,1)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12.25)$$

Струм на землю:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} = 3 \dot{I}_{\kappa A0} \quad (12.26)$$

Коефіцієнт пропорційності між струмами пошкодженої фази та прямої послідовності у місці КЗ оцінюємо виразом:

$$m^{(1,1)} = \left| a^2 - (\underline{Z}_{2\text{pez}} + a \underline{Z}_{0\text{pez}}) / (\underline{Z}_{2\text{pez}} + \underline{Z}_{0\text{pez}}) \right|. \quad (12.27)$$

За умови, що активні складові опору дорівнюють нулю,

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - x_{2\text{pez}} x_{0\text{pez}} / (x_{2\text{pez}} + x_{0\text{pez}})^2}. \quad (12.28)$$

Залежно від співвідношення значень $x_{2\text{pez}}$ та $x_{0\text{pez}}$ значення $m^{(1,1)}$ перебуває у межах $1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}$.

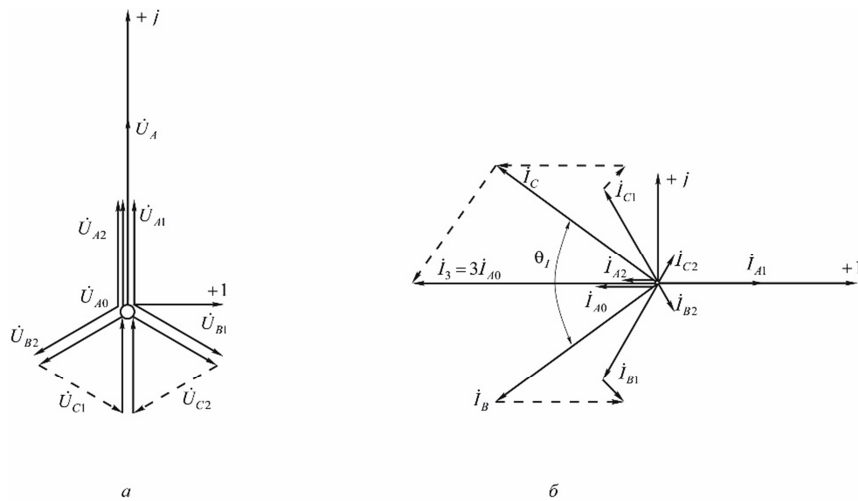


Рис. 12.4. Векторні діаграми фазних напруг (а) і струмів (б) та їх симетричних складових у місці двофазного КЗ на землю

На рис. 12.4 зображено векторні діаграми струмів та напруг у місці двофазного КЗ на землю, побудовані за тих же умов, що і векторні діаграми на рис. 12.2 та 12.3. Кут зсуву між струмами пошкоджених фаз θ_I (двофазне коротке замикання на землю) залежить від співвідношення значень опорів \underline{Z}_{1pez} та \underline{Z}_{0pez} і може змінюватись у межах $60^\circ < \theta_I < 180^\circ$. Верхня межа відповідає значенню $\underline{Z}_{0pez} = \infty$, нижня – $\underline{Z}_0 \rightarrow 0$, а за умови $\underline{Z}_{2pez} = \underline{Z}_{0pez}$ кут $\theta_I = 120^\circ$. Як і при однофазному КЗ на землю, нульова точка системи векторів (при двофазному короткому замиканні на землю) зміщена стосовно землі на значення напруги нульової послідовності. Тому слід розрізняти фазні напруги відносно землі та напруги фаз щодо нульової точки.

Перехідний опір в місці короткого замикання

У розподільних мережах підприємств урахування перехідних опорів у місці КЗ відіграє вагомую роль. Перехідний опір складається з опорів електричної дуги та елементів на шляху перебігу струму від однієї фази до іншої або від фаз на землю. Електрична дуга виникає чи з самого початку появи пошкодження, як наприклад при перекритті або пробіі ізоляції, чи трохи згодом, коли руйнується елемент, що викликав КЗ. При КЗ між фазами перехідний опір визначається переважно опором електричної дуги.

Значення перехідних опорів нерідко такі малі, що практично ними можна нехтувати. Звичайно, за інших рівних умов струм з подібним КЗ вищий, ніж під час перехідного опору. Тому при необхідності знайти можливі найбільші значення струмів виходять з найважчих умов, вважаючи, що в місці КЗ ніяких перехідних опорів немає (далі – дивись підручник).

Методи розрахунку несиметричних коротких замикань

Методи розрахунку характеристик перехідного процесу при трифазному КЗ за правилом еквівалентності для *струму прямої послідовності* можуть бути застосовані для розрахунку перехідного процесу за будь-якого несиметричного

КЗ. Періодичну складову струму прямої послідовності несиметричного КЗ визначають так само, як і періодичну складову струму трифазного КЗ, але тільки у точці, віддаленій від дійсної точки КЗ на додатковий опір $\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$. Під час розрахунку цього струму можна скористатися комплексною схемою заміщення. Струми зворотної та нульової послідовностей, а також напруги окремих послідовностей у точці КЗ визначаємо за струмом прямої послідовності (дивись підручник).

Ознайомимося з особливостями розрахунку параметрів режиму за несиметричного КЗ й наведемо відповідні алгоритми.

Розрахунок початкових значень періодичних складових параметрів режиму. Схеми заміщення загалом складають для всіх послідовностей: прямої, зворотної та нульової. Параметри схеми заміщення прямої послідовності визначають для моменту часу $t = 0$, для чого всі генератори, компенсатори та навантаження еквівалентують їх надперехідними опорами та е.р.с. Напруга прямої послідовності у будь-якій точці СЕП при несиметричному КЗ завжди нижча, аніж при трифазному КЗ у тій же точці, а тому *підживлення від окремих двигунів* за несиметричного КЗ виявляє себе *слабше* у порівнянні з трифазним КЗ. До приблизної оцінки ударного струму несиметричного КЗ часто не враховують впливу навантаження та окремих двигунів за винятком *потужних, безпосередньо пов'язаних з точкою КЗ*.

В інженерних розрахунках схему заміщення для зворотної послідовності отримують з такої ж схеми для прямої послідовності, вилучивши *е.р.с. та взявши* $\underline{Z}_{2\text{рез}} = \underline{Z}_{1\text{рез}}$.

Послідовність щодо обліку початкових значень періодичних складових параметрів режиму:

- складають схеми заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовностей, визначаючи параметри еквівалентів елементів (опорів) та е.р.с. джерел;
- перетворенням схем заміщення для окремих послідовностей відносно точки КЗ знаходять результуючі опори $\underline{Z}_{1\text{рез}}$, $\underline{Z}_{2\text{рез}}$, $\underline{Z}_{0\text{рез}}$;
- обчислюють струм прямої послідовності;
- залежно від виду КЗ визначають у місці КЗ струми зворотної та нульової послідовностей, напруги окремих послідовностей;
- обчислюють розподіл струмів окремих послідовностей у відповідних первинних розрахункових схемах та у разі необхідності враховують зміщення векторів струмів прямої і зворотної послідовностей на відповідні кути при їх трансформації;
- знаходять фазні струми та напруги для зазначених видів несиметричного КЗ.

Розрахунок параметрів режиму при несиметричному КЗ для $t > 0$ за типовими кривими генераторів. Типові криві можуть бути використані для встановлення значення періодичної складової струму прямої послідовності, а, отже, і повного струму у довільний момент часу перехідного процесу при несиметричному КЗ.

Якщо розрахункова схема містить лише одне еквівалентне джерело (синхронний генератор, компенсатор або групу генераторів, що мають однакові параметри та перебувають в однакових умовах відносно точки КЗ), то алгоритм розрахунку подібний до розглянутого у розд. 5 щодо трифазного КЗ:

- знаходять струм прямої послідовності генератора $I_G^{(n)}$;
- визначають електричну віддаленість точки еквівалентного трифазного КЗ від генератора:

$$I_{*1,G}^{(n)} = I_{1,G}^{(n)} / I_{G,ном} \quad (12.29)$$

де $I_{G,ном}$ – номінальний струм генератора, зведений до ступеня напруги мережі, де сталося КЗ;

- за знайденим значенням (залежність 12.29) вибирають відповідну типову криву і для потрібного моменту часу t визначають відношення:

$$\gamma_t^{(n)} = (I_{1,G,t}^{(n)} / I_{1,G}^{(n)}) \quad (12.30)$$

- за відношенням $\gamma_t^{(n)}$ обчислюють шукане значення періодичної складової струму несиметричного КЗ у момент часу t :

$$I_{G,t}^{(n)} = m^{(n)} \gamma_t^{(n)} I_{1,G}^{(n)} \quad (12.31)$$

Якщо СЕП має декілька джерел живлення, то їх доцільно розбити на дві групи. До першої слід занести джерела, електрично близько розташовані від місця КЗ (джерела обмеженої потужності), а до другої – електрично віддалені джерела чи такі, що характеризуються незмінною напругою на затискачах (джерела необмеженої потужності). Здебільшого, точка КЗ може виявитися за опором X_k , загальним для всіх груп джерел.

Для знаходження значень параметрів режимів за несиметричних КЗ використовують такий алгоритм:

- 1) визначають струм прямої послідовності у місці КЗ $I_{КАЛ\Sigma}^{(n)}$;
- 2) відшуковують струм прямої послідовності від кожного джерела у момент часу $t=0$;
- 3) оцінюють електричну віддаленість джерел від точки КЗ за відношенням $I_G'' / I_{Г,ном,i}$;
- 4) індивідуально введені до розрахункової схеми джерела розбивають за електричною віддаленістю $I_G'' / I_{Г,ном,i} \leq 2$ та $I_G'' / I_{Г,ном,j} > 2$ на дві групи;
- 5) комплексній схемі заміщення шляхом перетворень надають вигляду трипроменевої зірки, де у вітку з точкою $K_I^{(n)}$ увімкнений опір $X_A^{(n)}$;
- 6) визначають сумарний струм прямої послідовності віток $I_{Г\Sigma}^{(n)}$ віток $I_G'' / I_{Г,ном,j} > 2$;
- 7) виявляють відношення $I_{Г\Sigma}^{(n)} / I_{КАЛ\Sigma}^{(n)}$;
- 8) для моменту часу t та електричної віддаленості $I_{Г\Sigma}^{(n)} / \sum_{j=1} I_{Г,ном,j}''$ спершу

обчислюють відношення $I_{Гt} / I_G''$, а потім, використовуючи допоміжну типову криву $(I_{Г,t} / I_G'') = f_2(I_{Гt} / I_G'')$ відповідно до отриманого у п.7 співвідношення, визначають:

$$\gamma_t^{(n)} = I_{\Gamma,t} / I'' ; \quad (12.32)$$

9) знаходять шукане діюче значення періодичної складової струму в місці несиметричного КЗ для моменту часу t :

$$I_{II,t}^{(n)} = m^{(n)} \gamma_t^{(n)} I_{\kappa A1\Sigma}^{(n)} . \quad (12.33)$$

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Коефіцієнт пропорційності сполучає струми фазний та прямої послідовності.

2. При однофазних КЗ на землю слід розрізняти напругу фази стосовно землі (фазна напруга) та напругу нульової точки системи векторів.

3. Ці дві напруги різняться на складову напругу нульової послідовності.

4. Якщо напруга нульової послідовності відсутня, то фазна напруга щодо нульової точки системи векторів – відносно землі також.

5. Як і при однофазному КЗ на землю, нульова точка системи векторів при двофазному короткому замиканні на землю зміщена стосовно землі на значення напруги нульової послідовності.

6. Тому слід розрізняти фазні напруги відносно землі та напруги фаз щодо нульової точки.

7. Перехідний опір складається з опорів електричної дуги та елементів на шляху перебігу струму від однієї фази до іншої або від фаз на землю.

8. При КЗ між фазами перехідний опір визначається переважно опором електричної дуги.

9. При необхідності *знайти можливі найбільші значення* струмів виходять з найважчих умов, вважаючи, що в місці КЗ ніяких перехідних опорів немає.

10. Методи розрахунку характеристик перехідного процесу при трифазному КЗ за правилом еквівалентності для *струму прямої послідовності* можуть бути застосовані для розрахунку перехідного процесу за будь-якого несиметричного КЗ.

11. Періодичну складову струму прямої послідовності несиметричного КЗ визначають так само, як і періодичну складову струму трифазного КЗ.

12. Схеми заміщення загалом складають для всіх послідовностей: прямої, зворотної та нульової.

13. Напруга прямої послідовності у будь-якій точці СЕП при несиметричному КЗ завжди нижча, аніж при трифазному КЗ у тій же точці *підживлення від окремих двигунів* за несиметричного КЗ виявляє себе *слабше* у порівнянні з трифазним КЗ.

14. До приблизної оцінки ударного струму несиметричного КЗ часто не враховують впливу навантаження та окремих двигунів за винятком *потужних*, безпосередньо пов'язаних з точкою КЗ.

15. Типові криві можуть бути використані для встановлення значення періодичної складової струму прямої послідовності, а, отже, і повного струму у довільний момент часу перехідного процесу при несиметричному КЗ.

16. Якщо СЕП має декілька джерел живлення, то їх доцільно розбити на дві групи. До першої слід занести джерела, електрично близько розташовані від місця КЗ (джерела обмеженої потужності), а до другої – електрично віддалені джерела чи такі, що характеризуються незмінною напругою на затискачах (джерела необмеженої потужності).

Тестові питання по темі 12

1. Особливості виникнення поперечної несиметрії в електричних мережах.
2. Які припущення при розрахунках несиметричних аварійних режимів?
3. Умови та особливості аналізу однофазного короткого замикання.
4. Як оцінити коефіцієнт пропорційності при однофазному замиканні?
5. Як побудувати та пояснити векторні діаграми струмів та напруг при однофазному короткому замиканні?
6. Умови та особливості двофазного короткого замикання на землю.
7. Як оцінити коефіцієнт пропорційності при двофазному короткому замиканні?
8. Пояснити побудову та оцінити векторні діаграми струмів та напруг при двофазному короткому замиканні.
9. Як визначити перехідний опір в місці замикання?
10. Які особливості розрахунку несиметричних коротких замикань?
11. Який алгоритм розрахунку несиметричних коротких замикань?
12. Як виконують розрахунок за типовими кривими генераторів (несиметричні КЗ)?
13. Яка особливість розрахунків несиметричних аварійних режимів, якщо є декілька джерел живлення?
14. Як визначається «особлива» фаза?

ТЕМА 13 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ

Короткі замикання в мережах зовнішнього електропостачання

При КЗ в живильних мережах напругою 330 кВ та вище, окрім періодичної та аперіодичної складових струму короткого замикання, можна також виділити вищі гармонічні складові, обумовлені розподіленою поперечною ємністю лінії електропередач. При наявності в лінії електропередач *зосередженої поздовжньої ємності* струм КЗ містить і субгармонічну складову зі зниженою частотою порівняно з промисловою. Складові струму КЗ з урахуванням ємності лінії електропередач при КЗ у різних точках мережі обчислюють за допомогою комп'ютерної техніки.

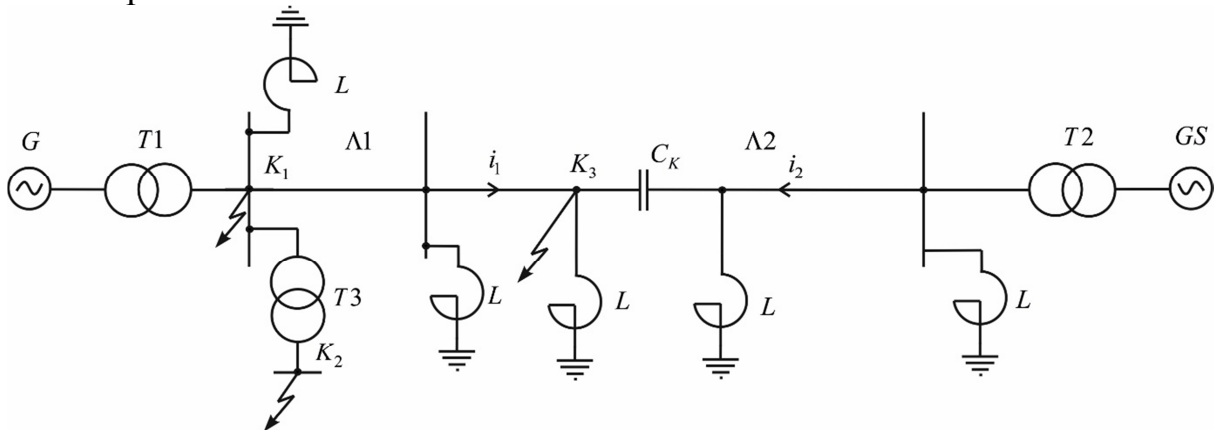


Рис. 13.1. Розрахункова схема для однієї з аналізованих умов

Розрахункова схема для однієї з умов на рис. 13.1 дає змогу встановити загальні залежності для розрахунку струмів КЗ у таких ЛЕП. З відсутністю поздовжньої ємності в лінії електропередач (КЗ у точці K_1 – на шинах джерела, а в точці K_2 – за трансформатором) повний струм у місці трифазного КЗ має лише *періодичну* (промислової частоти) та *аперіодичну складові*. Ці складові, як і *ударний струм* КЗ, визначають за наведеними раніше залежностями. Аналогічно струм КЗ розраховують при поздовжній ємності, якщо КЗ виникає за певним опором (точка K_3). Тут у сумарному опорі лінії електропередач ураховують опір:

$$x_k = -1/(\omega C_k), \quad (13.1)$$

де C_k – поздовжня ємність мережі.

При трифазному КЗ у будь-якій точці ЛЕП повний струм КЗ складається з суми струмів i_1 та i_2 , утворених джерелами, розміщеними по різні сторони від поздовжньої ємності. Розташування точки КЗ відносно ємності та джерела теж ураховують. Струм КЗ від генераторів (точка КЗ та джерело – з однієї сторони відносно поздовжньої ємності) містить *періодичну складову* промислової частоти і *періодичні та аперіодичні складові* від додаткового джерела у вигляді ємності. Цей струм визначають за залежностями стосовно випадків відсутності поздовжньої ємності. Струм КЗ від джерела електричної системи, яке відносно точки КЗ розташовано за поздовжньою ємністю (точки K_1 та K_3), має

періодичну складову промислової частоти, періодичні та субгармонічну складові за рахунок ємності мережі.

У лінії електропередачі напругою 330 кВ і вище відповідно до віддалення від джерела живлення періодична складова КЗ за амплітудою зменшується. Вільні періодичні складові в повному струмі КЗ при цьому зростають.

Відокремлення від електроенергетичної системи синхронного генератора або групи генераторів звичайно відбувається *при вимиканні КЗ*. Після деякої паузи під час дії автоматичного повторного вмикання генераторів на стійке КЗ початковий струм повторного КЗ може перевищити початковий струм першого пошкодження. Це слід урахувувати при виборі або ж перевірці апаратів за умов аварійного режиму.

Розрахункові умови визначаються реактивною потужністю, яку «скидає» генератор під час паузи автоматичного повторного вмикання, параметрами застосованої системи збудження генератора, межами регулювання збудження, тривалістю першого КЗ та його електричною віддаленістю, а також паузою автоматичного повторного вмикання. Зростання реактивної потужності, скинутої генератором, наближення зовнішнього опору до 0,6...0,7 відносних одиниць виміру щодо номінальних параметрів генератора та збільшення тривалості початкового аварійного режиму супроводжуються зростанням відношення *початкового* струму повторного КЗ до *початкового струму першого пошкодження*. Початковий струм повторного КЗ *не перевищує початкового струму* першого пошкодження за умов:

- відокремлення гідрогенератора від електроенергетичної системи протягом 0,5 с, а турбогенератора – не більше 1 с з часу виникнення аварійного режиму;
- оснащення генераторів вентиляційною системою збудження, якщо пауза автоматичного повторного вмикання не перевищує 0,7 с з моменту вимкнення *турбогенератора*, та 1 с – з моменту вимкнення *гідрогенератора*. Тоді при виборі або ж перевірці апаратів та провідників за умов КЗ струм першого пошкодження стає розрахунковим.

Замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

Цей вид замикання – найпоширеніший у мережах з малим струмом замикання на землю. Процеси, що відбуваються в таких мережах досить складні й істотно залежать від параметрів та схеми мережі, опору контуру перебігу струму замикання.

Опір нульової послідовності в мережах напругою 6–35 кВ визначається в основному ємністю елементів мережі відносно землі. Тому замикання на землю в мережах 6–35 кВ супроводжуються перебігом малих струмів пошкодження, які *менші за струми навантаження*. Це особливо характерне для мереж з повітряною лінією напругою 6–10 кВ, де ємність провідників відносно землі невелика. В мережах з кабельною лінією та протяжними повітряними лініями напругою 10–35 кВ можливі значні струми замикання на землю.

Для поліпшення гашення дуги та запобігання переходу замикання на землю в міжфазне КЗ у мережах, що розглядаються, встановлюють дугогасильні

котушки, з допомогою яких компенсується основна гармоніка ємнісного струму замикання на землю. Як наслідок – *результуючий струм пошкодження* у таких мережах в усталеному режимі різко зменшується. При замиканні на землю струм, що перебігає пошкодженим з'єднанням (рис. 13.2,а), дорівнює сумі струмів непошкоджених елементів, що визначаються ємністю та активним опором ізоляції відносно землі кожного з них, та струму дугогасильної котушки (при її наявності).

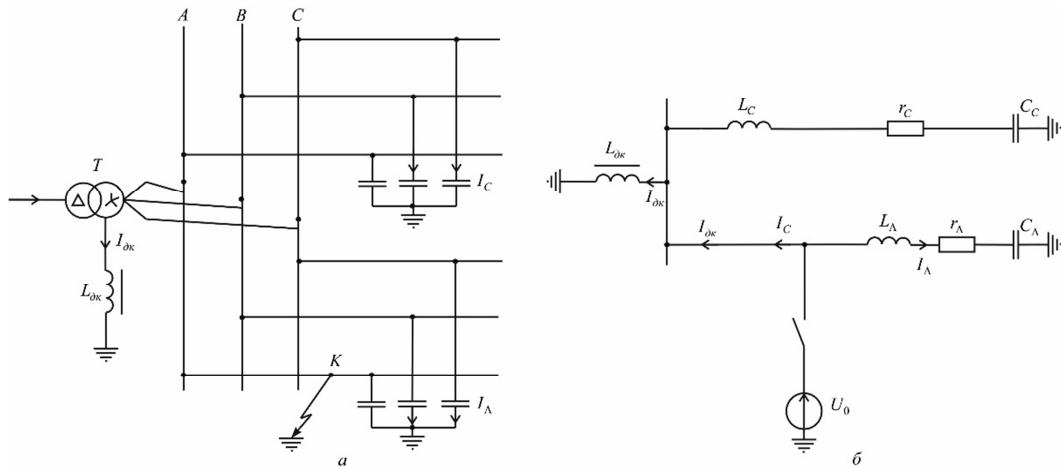


Рис. 13.2. Приклад однофазного КЗ в електричній мережі:
а – розрахункова схема; б – схема заміщення для нульової послідовності

У некомпенсованих мережах струми основної гармоніки на пошкодженому та непошкодженому з'єднаннях спрямовані в протилежні сторони, що пояснюється розташуванням джерела напруги нульової послідовності в місці замикання (рис. 13.2,б). Тому струм I_C , який визначається ємнісним опором непошкодженої мережі, у пошкодженому елементі перебігає в напрямку *до шин*, а в непошкодженому — *від них*.

При вмиканні дугогасильної котушки $L_{д.к}$ в нейтраль одного з трансформаторів фаза основної гармоніки струму пошкодження залежатиме від співвідношення між значенням ємності непошкоджених ділянок та індуктивністю котушки. Якщо переважає індуктивна складова струму пошкодження, то фази реактивних складових струму пошкодження однакові на непошкодженому (ємнісний струм, спрямований до лінії) і пошкодженому (індуктивний струм, спрямований до шин) приєднаннях.

Значення і фаза струмів замикання визначаються напругою нульової послідовності U_0 . Найбільше значення U_0 буде при замиканнях на землю без перехідного опору і дорівнюватиме фазній напрузі мережі. При замиканнях через перехідний опір значення U_0 встановлюється співвідношенням між *опором нульової послідовності та перехідним опором*. Кут між напругою U_0 та струмом замикання на землю завжди однаковий і дорівнює куту опорів

нульової послідовності мережі. Наявність перехідного опору зменшує значення U_0 і кут відносно фазної напруги.

Оцінка аварійних режимів замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю має принципово важливе значення для підприємств та об'єктів щодо надійності електропостачання, електробезпеки та конструктивного виконання устаткування. Це характерне, передусім, для *гірничих підприємств* – потужних та важливих споживачів електричної енергії з специфічними особливостями (складні гірничо-геологічні умови, вибухобезпечність вугільних шахт), сукупність яких якісно відрізняє їх від загальнопромислових об'єктів. За приклад *візьмемо аварійні режими шахтних електричних мереж*.

Для обмеження умов відкритого іскроутворення в підземних виробках шахт у зв'язку з комутаційними перенапругами, а також попередження неправильних дій захисту від струмів витоку через погіршення стану ізоляції електроустановок зазначені мережі живляться від спеціальних розподільних або триобмоткових трансформаторів (35–110)/6/6 кВ.

У шахтній електричній мережі спостерігається *найбільша кількість пошкоджень*. Причина – несвоєчасне усунення несправностей в електроустаткуванні, а також помилкові дії обслуговуючого персоналу.

В умовах експлуатації шахтного електроустаткування вугільний пил та волога осідають довкола елементів устаткування, внаслідок чого можуть виникати струми витоку, які за певних обставин сприяють КЗ з небезпечними наслідками. Основна причина КЗ у підземних шахтних мережах – *механічне пошкодження електроустаткування*. Найчастіше зазнають ушкоджень шахтні броньовані та особливо гнучкі кабелі. У шахтних виробках КЗ можуть стати причиною підземних пожеж, що насамперед небезпечно для людей. За певних ситуацій КЗ призводять до порушення безпечних умов експлуатації шахтного електроустаткування. Захист від струмів КЗ – *один з основних засобів створення вибухо- та пожежобезпеки від електроустаткування*.

У струмі замикання на землю практично завжди містяться складові з частотами, що перевищують промислову частоту. В момент замикання на землю виникає перехідний процес, в якому можна виділити дві стадії. Початкова стадія характеризується *розповсюдженням електромагнітних хвиль* в обидві сторони по мережі від місця пошкодження. Тут частота складових перехідного процесу велика (до сотні кілогерц), а тривалість процесу мала. В другій стадії характер перехідного процесу приблизно такий же, як і в контурах із зосередженими параметрами. Орієнтовно перехідний процес можна оцінити за схемою заміщення для нульової послідовності, на яку подається напруга збурення $u_0(t)$.

Як установлено та підкріплено дослідями, вищі гармоніки практично завжди присутні в струмі замикання і складають 5...15 % від значення струму основної гармоніки. Гармонічний склад струму замикання залежить від виду мережі, умов замикання і може змінюватися в широких межах.

Короткі замикання в мережах струму підвищеної частоти

Електромагнітні процеси в мережах струму підвищеної частоти (до 10000 Гц) при аварійних режимах розраховують за тих же умов та формул, що і в мережах промислової частоти (50 Гц). На підвищених частотах помітний прояв *поверхневого ефекту* та *ефекту близькості*. Тому струм у перерізі провідника *розподіляється нерівномірно*. Глибина проникнення струму в провідник з немагнітного матеріалу визначається за виразом:

$$\Delta = 5030\sqrt{\rho/f}, \quad (13.2)$$

де ρ – питомий опір провідника, Ом·см; f – частота струму, Гц.

Значення Δ зменшується із зростанням частоти та поперечного перерізу провідника. Активний та індуктивний опори провідника при цьому зростають, що викликає зменшення допустимого тривалого струму навантаження і збільшення втрат напруги. В провідниках з перерізом 10 мм² та менше коефіцієнт поверхневого ефекту незначний і при розрахунках мереж струму підвищеної частоти на нього не зважають.

Ефект близькості визначає перерозподіл змінного струму в провіднику з наближенням до нього другого провідника зі струмом або провідника з наведеним струмом. Перерозподіл існує при будь-якій конфігурації перерізу суцільного провідника.

З підвищенням частоти *розміри* та маса магнітопроводу електричних машин і трансформаторів зменшуються. Електричні мережі струму підвищеної частоти більш металомісткі, аніж мережі струму промислової частоти в зв'язку з тим, що перерізи провідників більші. У цілому розміри електроустановок струму підвищеної частоти менші за аналогічні установки *промислової частоти*.

Основне завдання розрахунку та аналізу аварійних режимів у мережах підвищеної частоти – визначення їх параметрів при *міжфазних* та *однофазних* КЗ на корпус (землю), *перевантаженнях*, *зниженнях напруги* або ж під час її *короткочасних* вимикань. Електричні мережі струму підвищеної частоти утворюють з використанням шинопроводів та кабелів, а також з ізольованих провідників, прокладених відкрито чи в трубах. Провідники для них звичайно вибирають за припустимих значень нагрівання та втрат напруги, а потім перевіряють за струмом КЗ.

Аварійні режими в мережах струму підвищеної частоти обчислюють з урахуванням відповідної схеми розподілу електричної енергії: радіальної, магістральної або магістрально-радіальної. *Радіальна схема* застосовується для окремих споживачів достатньо великої потужності (понад 20 кВт), якщо пункт живлення – приблизно в центрі цих навантажень. При *магістральній схемі* одна лінія-магістраль живить електроенергією підвищеної частоти кілька приймачів порівняно невеликої потужності (менше 20 кВт), приєднаних до неї в різних точках. За радіальної схеми використовують кабелі або провідники у трубах, а за магістральної – струмоводи.

Процеси, обумовлені особливостями технології виробництва

Електротехнологічні установки – широкоживані в різних галузях народного господарства зараз та з досить значними перспективами. Як споживачі електричної енергії ці установки мають низку *специфічних особливостей*, зокрема різноманітні режими роботи та перехідні процеси в СЕП підприємств. Це обумовлене *різкозмінним, імпульсним, несинусоїдальним чи несиметричним характером* навантаження, зміною напруги, появою електромагнітних перешкод у мережах і т.д. Коливання напруги викликані різкозмінними та ударними навантаженнями, характерними, в першу чергу, для електродугових сталеплавильних печей та електрозварювальних установок. Вони також можуть утворюватися такими споживачами, як вентиляльні перетворювачі для прокатних станів, електротягові установки тощо.

Відомо, що коливання напруги класифікують як зміни модуля напруги, які проходять з швидкістю не менше відсотка від номінальної напруги за секунду. Коливання напруги впливає на роботу світлотехнічних пристроїв, радіотелевізійної апаратури, систем автоматики та управління, обчислювальної техніки. При нелінійному навантаженні генеруються вищі гармоніки струмів, які перевантажують конденсаторні батареї, що викликає додаткові втрати потужності. Коливання напруги погіршує енергетичні показники електроустаткування та електричних мереж, а також змінює механічні характеристики електродвигунів, що небажано.

Нижче мова піде про особливості перебігу перехідних процесів у деяких електротехнологічних установках. *Електродугові сталеплавильні печі* належать до споживачів з циклічним різкозмінним режимом. Один з періодів графіка їх навантаження – *плавлення металу* – характеризується *найбільшою нерівномірністю* (сильні та часткові випадкові коливання струму), що пояснюється експлуатаційними КЗ. Протягом цього періоду витрачається 50...80 % усієї використаної за час плавки енергії, створюється ударний ефект в електромережі. Для дугових печей характерна значна кількість вимикань від мережі під час плавки, пов'язаних з технологічними операціями або аварійними зупинками (до 10 за плавку).

У мережах *підприємств з дуговими печами* практично будь-які зміни напруги можна розглядати як *коливання*. Випадкові коливання напруги в живильній мережі часто перевищують допустимі межі і обумовлені коливаннями струму в печі через КЗ чи розрив дуги, періодичний характер регулювання процесу, а також особливості електричної дуги, що викликає коливання струму частотою від 2 до 10 кГц з амплітудою ± 15 %. Коливання напруги складають 2...4 % при напрузі 110 і 35 кВ та 3...12 % при 6 і 10 кВ. Частота таких коливань – 0,5...1 Гц.

Ударний ефект дугових сталеплавильних печей оцінюють за допомогою методів, якими користуються при аналізі електричних кіл. Оцінка має велике значення для побудови СЕП підприємств з урахуванням впливу таких установок. Через випадковий *характер змін параметрів навантаження* дугових печей і розмахів коливань напруги при їх аналізі та нормуванні слід застосовувати методи теорії випадкових процесів. Аналізуючи коливання

напруги в мережах живлення паралельно ввімкнених дугових печей, необхідно зважати на електромагнітний взаємний вплив.

Технологічні вимкнення дугових печей після обриву пічних дуг супроводжуються комутаційними перенапругами на обмотках вимкненого трансформатора. Оскільки кількість таких вимикань велика, а перенапруга значна, їх необхідно брати до уваги при розробці обладнання електропічної установки.

Рівень перенапруг визначається переважно *швидкістю вимикача*. Комутаційні перенапруги залежать від режиму роботи трансформатора. Найбільший рівень перенапруг (*семиразовий*) можливий при *вимиканнях ненавантажених трансформаторів*. Найсприятливіший режим з погляду виникнення значних перенапруг (*п'ятиразових*) при вимиканнях трансформаторів під навантаженням – це вимикання двофазного навантаження з струмами, близькими до значень струмів ненавантаженого агрегату. Напруги розраховують з використанням методів, поширених в електротехніці.

Кратність можливих кидків струму намагнічування при вмиканні трансформаторів досягає $4I_{ном}$. Кидки струмів різко зменшуються з переходом на нижчі ступені напруги, а також з прогріванням печі.

Імпульсний характер графіків навантаження *електрозварювальних установок призводить до появи провалів* в обвідній кривій напруги, форма яких залежить від форми індивідуальних імпульсів струму зварювання.

У мережах, що живлять групи зварювальних установок, *провали напруги мають випадковий характер*. Найбільші провали напруги (до 30 %) у тих мережах, що живлять стикові та багатоточкові установки, а найменші – у мережах, які живлять *дугові зварювальні установки* (не більше 3%). Максимум частот провалів напруги групових графіків складає 1,8...4 Гц. Електрозварювальні установки також створюють коливання напруг, середня частота яких $f_{п,ср} = 2n / t_{п,ср}$. Коливання напруг – різноманітні: від *періодичних прямокутних* до *випадкових марковських*. Максимальна частота коливань напруги в групових мережах складає 5...12 Гц. Основна енергія спектра коливань зосереджена в інтервалі 2,5...3 Гц. Електрозварювальні установки працюють в імпульсному режимі. Тому необхідно враховувати появу відбиття цього режиму у вигляді перехідного процесу споживаного струму. При асинхронному вмиканні амплітудне значення перехідного струму може досягти триразового значення номінального струму. Тривалість процесу – від трьох до шести періодів.

Короткі замикання в мережах постійного струму

Постійний струм застосовується для живлення електролізних установок кольорової металургії та хімічної промисловості, дугових вакуумних та графітових електропечей, установок для електрохімічної обробки металів та гальваностегії, електричного транспорту, електроприводу, зарядних пристроїв, цехових мереж. Мережі постійного струму для живлення *сигналізації та диспетчеризації* звичайно мають малу потужність.

Для випрямлячів застосовують трифазну мостову схему, шестифазну нульову із зрівняльним реактором, трифазну нульову схему перетворення. *Випрямлячі малої потужності* – з трифазною нульовою схемою. В трифазній мостовій схемі (рис. 13.3,а) *первинна і вторинна обмотки живильного трансформатора з'єднані на «зірку» або «трикутник»*. Кожна фаза вторинної обмотки через вентилі сполучена з позитивним та від'ємним полюсами кола постійного струму. В шестифазній нульовій схемі (рис. 13.3,б) первинна обмотка живильного трансформатора поєднується на «зірку» або «трикутник», а вторинна – на дві зворотні «зірки», нульові точки яких сполучені через зрівняльний реактор. Середня точка зрівняльного реактора – це *від'ємний полюс постійного струму*.

У трифазній нульовій схемі вторинна обмотка трансформатора поєднана на зірку або зигзаг із виведеною нульовою точкою. В першому випадку первинна обмотка повинна бути з'єднана на «трикутник», а в другому – на «зірку».

Процеси при КЗ у всіх *мережах постійного струму* однакові: КЗ виникає в основному з причин, що й у *мережах змінного струму*.

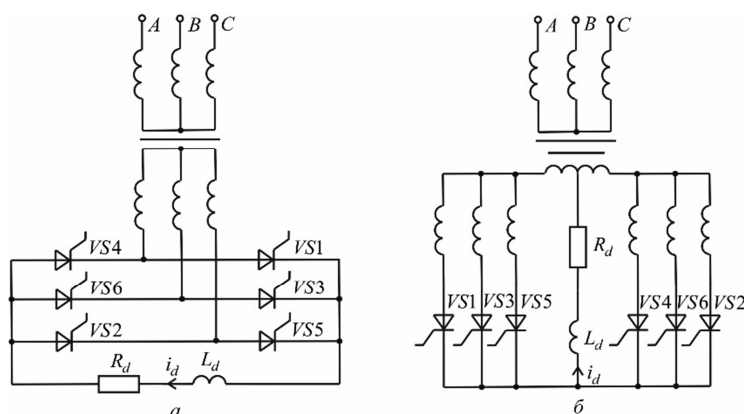


Рис. 13.3. Схеми випрямлення трифазного змінного струму:
а – трифазної мостової; б – шестифазної зрівняльним реактором

Аварійні режими можливі при неприпустимих перевантаженнях, коли виходять з ладу окремі елементи силової схеми випрямляча або в системах управління та автоматичного регулювання.

Розрахунок цих режимів необхідний для *вибору параметрів силової схеми випрямляча та засобів захисту*.

Аварії розподіляють на *зовнішні та внутрішні* (зіпсованість елементів силової схеми, пошкодження одного з вентилів моста). Внаслідок зовнішніх аварій можуть вийти з ладу вентилі та розвинутися внутрішні аварії.

Розглянемо аварійні режими для двох схем випрямлення: *трифазної мостової та шестифазної нульової із зрівняльним реактором*. Припущення: *параметри силових елементів випрямляча – лінійні; нелінійність зовнішньої характеристики випрямляча внаслідок зміни числа вентилів, що комутуються, в процесі КЗ ураховується лише при великій тривалості перехідного процесу і малій віддаленості КЗ; трифазна система живлення – симетрична та*

зрівноважена; *намагнічувальні* струми трансформаторів та відповідні ємності елементів електроустаткування – малі; *аварія виникає* при усталеному режимі живильної мережі. Ці *припущення дають змогу отримати достовірний рівень результатів* відповідно до вимог практики.

Струм зовнішнього КЗ випрямляча при навантаженні I_d у перехідному режимі :

$$i_k = I_k \cdot [1 - \exp(-tR_d / L_d)] + I_d \cdot \exp(-tR_d / L_d). \quad (13.3)$$

Тут зовнішня характеристика випрямляча (за характером електромагнітних процесів і можливих умов КЗ) складається з двох частин: прямолінійної та еліптичної.

Сталий струм КЗ залежить від схеми випрямляча, режиму його роботи та параметрів кола. При малих значеннях аварійного струму (віддалені КЗ) та почерговій роботі двох–трьох вентилів схеми, коли зовнішня характеристика випрямляча прямолінійна (кут комутації вентилів $\gamma < 60^\circ$, режим 1), для розглянутих схем випрямлення маємо відповідно:

$$\begin{aligned} I_{k(a)} &= 1,35U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / [r_{рез(a)} + 0,955(x_C + x_{TP} / n)]; \\ I_{k(b)} &= 0,675U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / [r_{рез(b)} + 0,239(x_C + x_{TP} / n)], \end{aligned} \quad (13.4)$$

де $U_{2Л}$ – вторинна лінійна напруга трансформатора, що живить випрямляч, В; Δu_C – втрата напруги живильної мережі, %; n – число паралельно працюючих випрямлячів.

Для великих значень аварійного струму (КЗ поблизу випрямляча) і одночасній роботі трьох вентилів схеми, коли зовнішня характеристика випрямляча еліптична (кут $\gamma = 60^\circ$, режим 2), справедливо:

$$\begin{aligned} I_{k(a)} &= 1,17U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{рез(a)}^2 + [3(x_C + x_{TP} / n) / 2]^2}; \\ I_{k(b)} &= 0,585U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{рез(b)}^2 + [3(x_C + x_{TP} / n) / 2]^2} \end{aligned} \quad (13.5)$$

Активні опори випрямлячів при КЗ визначають за виразами:

$$\begin{aligned} r_{рез(a)} &= 3r_{TP} / (2n) + r_{3ш} + r_\delta; \\ r_{рез(b)} &= 3r_{TP} / (2n) + r_{3ш} + r_\delta; \end{aligned} \quad (13.6)$$

індуктивності в режимі 1:

$$\begin{aligned} L_{рез(a)} &= 0,955(x_C + x_{TP} / n) / \omega + L_{3ш}; \\ L_{рез(b)} &= 0,239(x_C + x_{TP} / n) / \omega + L_{3ш}, \end{aligned} \quad (13.7)$$

а в режимі 2:

$$\begin{aligned} L_{рез(a)} &= 3(x_C + x_{TP} / n) / (2\omega) + L_{3ш}; \\ L_{рез(b)} &= 3(x_C + x_{TP} / n) / (8\omega) + L_{3ш}. \end{aligned} \quad (13.8)$$

Опір дуги $r_\delta = 0,01 \dots 0,015$ Ом. Струми КЗ на шинах випрямлячів з опором дуги $r_\delta = 0$ для розглянутих схем можна розрахувати за формулами:

$$I_{k(a)} = 0,78U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{TP}^2 + (x_C + x_{TP})^2};$$

$$I_{к(б)} = 1,56U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{TP}^2 + (x_C + x_{TP})^2}, \quad (13.9)$$

де опори x_C, r_{TP}, x_{TP} (Ом) визначаються так:

$$\begin{aligned} x_C &= U_{2Л}^2 \cdot 10^{-6} / S_K; \\ r_{TP} &= \Delta P_M U_{2Л}^2 10^{-3} / S_{TP}^2; \\ x_{TP} &= U_{2Л}^2 10^{-5} \sqrt{u_K^2 - (100 \Delta P_M / S_{TP})^2}, \end{aligned} \quad (13.10)$$

де S_K – потужність КЗ на шинах змінного струму; ΔP_M – потужність втрат в обмотках трансформатора при КЗ.

Перехід від режиму 1 до режиму 2 відбувається при значеннях аварійного струму випрямлячів:

$$\begin{aligned} I_{к,П(a)} &= 0,26U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / (x_C + x_{TP}); \\ I_{к,П(б)} &= 0,26U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / (x_C + x_{TP}). \end{aligned} \quad (13.11)$$

За менших (більших) значень струмів КЗ, аніж значення $I_{к,П}$, для їх визначення необхідно використати відповідно вирази (13.4) та (13.5).

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. При КЗ в живильних мережах напругою 330 кВ та вище, окрім періодичної та аперіодичної складових струму короткого замикання, можна також виділити вищі гармонічні складові, обумовлені розподіленою поперечною ємністю лінії електропередач.

2. При наявності в лінії електропередач *зосередженої поздовжньої ємності* струм КЗ містить і субгармонічну складову зі зниженою частотою порівняно з промисловою.

3. У лінії електропередачі напругою 330 кВ і вище відповідно до віддалення від джерела живлення періодична складова КЗ за амплітудою зменшується.

4. Вільні періодичні складові в повному струмі КЗ при цьому зростають.

5. Після деякої паузи під час дії автоматичного повторного вмикання генераторів на стійке КЗ початковий струм повторного КЗ може перевищити початковий струм першого пошкодження.

6. Розрахункові умови визначаються реактивною потужністю, яку «скидає» генератор під час паузи автоматичного повторного вмикання, параметрами застосованої системи збудження генератора, межами регулювання збудження, тривалістю першого КЗ та його електричною віддаленістю, а також паузою автоматичного повторного вмикання.

7. Початковий струм повторного КЗ *не перевищує початкового струму* першого пошкодження.

8. Замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю - найпоширеніше у мережах з малим струмом замикання на землю.

9. Процеси в таких мережах досить складні й істотно залежать від параметрів та схеми мережі, опору контуру перебігу струму замикання.

10. Опір нульової послідовності в мережах напругою 6–35 кВ визначається в основному ємністю елементів мережі відносно землі.

11. Замикання на землю в мережах 6–35 кВ супроводжуються перебігом малих струмів пошкодження, які *менші за струми навантаження*.

12. В мережах з кабельною лінією та протяжними повітряними лініями напругою 10–35 кВ можливі значні струми замикання на землю.

13. Для поліпшення гашення дуги та запобігання переходу замикання на землю в міжфазне КЗ у мережах встановлюють дугогасильні котушки, з допомогою яких компенсується основна гармоніка ємнісного струму замикання на землю.

14. У некомпенсованих мережах струми основної гармоніки на пошкодженому та непошкодженому з'єднаннях спрямовані в протилежні сторони, що пояснюється розташуванням джерела напруги нульової послідовності в місці замикання.

15. Значення і фаза струмів замикання визначаються напругою нульової послідовності.

16. Оцінка аварійних режимів замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю має принципово важливе значення для підприємств та об'єктів щодо надійності електропостачання, електробезпеки та конструктивного виконання устаткування.

17. У струмі замикання на землю практично завжди містяться складові з частотами, що перевищують промислову частоту.

18. Вищі гармоніки практично завжди присутні в струмі замикання і складають 5...15 % від значення струму основної гармоніки. Гармонічний склад струму замикання залежить від виду мережі, умов замикання і може змінюватися в широких межах.

19. Електромагнітні процеси в мережах струму підвищеної частоти (до 10000 Гц) при аварійних режимах розраховують за тих же умов та формул, що і в мережах промислової частоти. На підвищених частотах помітний прояв *поверхневого ефекту* та *ефекту близькості*. Тому струм у перерізі провідника *розподіляється нерівномірно*.

20. З підвищенням частоти *розміри* та маса магнітопроводу електричних машин і трансформаторів зменшуються. Електричні мережі струму підвищеної частоти більш металомісткі, аніж мережі струму промислової частоти в зв'язку з тим, що перерізи провідників більші. Розміри електроустановок струму підвищеної частоти менші за аналогічні установки *промислової частоти*.

Тестові питання по темі 13

1. Особливості КЗ у живильних мережах напругою 330 кВ та вище.
2. Загальні залежності, що використовуються при розрахунках струмів КЗ у живильних мережах?
3. Складові повного струму трифазного КЗ для умов Рис. 13.1?
4. Особливості розрахунку КЗ у мережах струму підвищеної частоти?
5. Чим характеризуються замикання на землю в мережах напругою 6–35 кВ?
6. З якою метою застосовують дугогасильні реактори і як вони впливають на перебіг процесів при замиканнях на землю?
7. Значення оцінки режимів замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю?
8. Особливості перехідних процесів в електротехнологічних установках?
9. Умови виникнення КЗ у мережах постійного струму?
10. Режими роботи випрямлячів при можливих КЗ?
11. Як здійснюється перехід від режиму 1 до режиму 2 при розрахунку КЗ у колі випрямляча?
12. Замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю.

ТЕМА 14

РІВНІ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Якість електромагнітних перехідних процесів

Основне джерело в електропостачанні промислових підприємств – електроенергетична система (ЕЕС). Тенденції зростання кількості та потужності джерел електричної енергії в ЕЕС, наближення джерел живлення до споживачів, збільшення числа і потужності синхронних та асинхронних двигунів у вузлах навантаження означають одночасно підвищення *рівня потужності і струмів КЗ* на шинах знижувальних підстанцій та в розподільних електричних мережах СЕП. Це обумовлює підвищені вимоги відносно *електродинамічної та термічної стійкості елементів СЕП, а також функціонування комутаційної апаратури, засобів захисту, системної автоматики.*

При створенні СЕП слід узгоджувати поставлені вимоги до елементів з можливими перехідними процесами. Аналіз електромагнітних перехідних процесів з оцінкою їх якості необхідний для проектування і правильної експлуатації СЕП.

Перехідні процеси щодо узгодження з вимогами до СЕП з їх елементами характеризуються якісними та кількісними показниками. Останні звичайно є функціоналами залежності параметрів режиму від тривалості або їх граничними значеннями і містять певну інформацію. Показники якості електромагнітних перехідних процесів, що виникають при *переході СЕП* від нормального режиму роботи до аварійного, *оцінюють за такими їх властивостями, характеристиками та наслідками.*

Тривалість перехідного процесу – інтервал часу, протягом якого СЕП переходить з одного стійкого стану до іншого. Тривалість процесів, близьких до аперіодичних, можна оцінити інтервалом часу $t_{\text{трив}} \leq 3T_a$, якщо скористатися значенням еквівалентної *постійної часу електричної мережі* T_a . При перехідних процесах, які виникають *внаслідок раптових порушень* нормального режиму, звичайно прагнуть скоротити час аварійного режиму. Оцінюючи розрахункову тривалість аварійного режиму (КЗ), цей інтервал часу складають з мінімального часу дії засобів захисту $t_{3\text{min}}$ та власного часу вимикання комутаційної апаратури $t_{3,\text{вим}}$:

$$\tau = t_{3\text{min}} + t_{3,\text{вим}}$$

Можливі порушення режиму (вмикання, вимикання, КЗ, пуск тощо) розраховують за тривалістю для кожного виду електроустаткування з метою порівняння з допустимим часом перебігу перехідного режиму, який може обмежуватися *технічними чи технологічними умовами, вимогами безпеки, перегріванням і т. ін.*

Характер перехідного процесу оцінюють за зміною струму протягом певного часу. *Характер* електромагнітного перехідного процесу залежить від потужності джерел електричної енергії, параметрів електричних мереж, наявності на генераторах пристроїв АРЗ, встановлення в електричних мережах пристроїв АПВ.

Характер перехідного процесу зміни параметрів режиму може бути *аперіодичним, коливальним* з незмінною або аперіодично мінливою амплітудою чи *монотонним*. При розрахунку параметрів режиму КЗ використовують якісну оцінку характеру перехідного процесу за амплітудою. Щодо розмагнічувальної дії реакції статора генераторів при перебігу струму КЗ джерела живлення умовно розподіляють на *джерела необмеженої та обмеженої потужності* (за електричною віддаленістю від місця КЗ).

Кількісні оцінки у визначенні характеру перехідного процесу – *коефіцієнт затухання періодичної складової струму КЗ*:

$$\gamma_{\text{пт}} = I_{\text{пт}} / I'' \quad (14.1)$$

і *коефіцієнт затухання аперіодичної складової струму КЗ*:

$$\gamma_{\text{ат}} = i_{\text{ат}} / i_{\text{а}(t=0)}. \quad (14.2)$$

Небезпечні наслідки для обладнання СЕП оцінюють відповідно такими *показниками перехідного процесу* струму КЗ:

– *електродинамічною стійкістю елементів СЕП* (перевіряється за ударним струмом при трифазному КЗ);

– *термічною стійкістю* (оцінюється за *найбільшим тепловим імпульсом* струму при *три- або двофазному КЗ*):

$$B_{\text{к}} = \int_0^t i_{\text{к}}(t) dt. \quad (14.3)$$

Вплив параметрів аварійного перехідного процесу на нормальні режими роботи СЕП та її елементів оцінюють таким чином. Для СЕП підприємств оцінку цього впливу відображають залежності показників якості електричної енергії в електроприймачів зі складним режимом споживання енергії від рівня потужності КЗ:

– *коефіцієнтом несинусоїдності*:

$$K_{\text{нс}} = S_{\text{н,а}} / S_{\text{к}} \leq 0,05, \quad (14.4)$$

пропорційний сумарній потужності *перетворювальних агрегатів* $S_{\text{н,а}}$ та обернено пропорційний потужності КЗ;

– *коефіцієнтом зворотної послідовності*:

$$K_{2U} \approx S_{\text{н,о}} / S_{\text{к}} \leq 0,02, \quad (14.5)$$

пропорційний *потужності однофазного навантаження* $S_{\text{н,о}}$ та обернено пропорційний потужності КЗ;

– *коливанням напруги*:

$$\delta V = (\Delta P_{\text{рез}} / r_{\text{рез}} + \Delta Q) / S_{\text{к}}, \quad (14.6)$$

пропорційні накиду потужності реактивного навантаження та обернено пропорційні потужності КЗ;

– *коливанням частоти*:

$$\Delta f \approx (\Delta P / \Delta t) / (2\pi S_{\text{к}}), \quad (14.7)$$

пропорційні швидкості накиду активної потужності у електроприймачів з різкозмінним навантаженням та обернено пропорційні потужності КЗ.

Вартість додаткових заходів для поліпшення необхідних характеристик перехідного процесу в СЕП оцінюють таким чином. Для СЕП великих

підприємств струми КЗ досягають на приймальних пунктах електричної енергії таких значень, що без їх обмежень не обійтись. Вирішення цього завдання вимагає додаткових капітальних вкладень.

Як бачимо, *показники якості електромагнітних перехідних процесів* по-різному характеризують умови функціонування СЕП та електроприймачів. В основі якісної оцінки всіх показників лежать струми та потужності КЗ. Для СЕП *характерне протиріччя в оцінці їх рівня*. З погляду зниження вартості елементів СЕП та поліпшення умов їх роботи рівні струмів та потужності КЗ бажано зменшувати, а забезпечення якості електричної енергії у електроприймачів, навпаки – підвищувати. *Звідси – пошук компромісного вибору показників якості електромагнітних перехідних процесів та рівнів струму і потужності КЗ.*

Способи обмеження струмів короткого замикання

Рівні струмів та потужності КЗ характеризують очікувані умови роботи електрообладнання СЕП в аварійних ситуаціях. Вони визначають вибір *перерізу шин, струмоводів, провідників та кабелів, вимикальну і комутаційну властивості апаратів, електродинамічну та термічну стійкість* струмоведучих частин і конструкцій електрообладнання за чинниками аварійного режиму. Це не лише ставить жорсткіші вимоги до його технічних характеристик, а й свідчить про відповідне зростання вартісних показників.

При проектуванні СЕП вирішується техніко-економічне завдання щодо обмеження рівнів струмів та потужності КЗ до значень, *допустимих параметрами* економічно вигідного електрообладнання.

У процесі експлуатації СЕП має місце додавання нових джерел електричної енергії і постає питання обмеження рівнів *струмів та потужності КЗ*, якщо вони перевищують технічні параметри встановленого електрообладнання. Для цього використовують різні заходи, пов'язані з обмеженням струмів КЗ і спрямовані на збільшення значень електричного опору кола КЗ, локалізацію в аварійному режимі джерел його живлення та вимикання пошкодженої електричної мережі за час $t < 1/(4f)$ (для частоти струму $f = 50$ Гц складає $t < 5$ мс). До таких заходів також належать: вибір структури і схеми електричних з'єднань елементів СЕП; стаціонарний чи автоматичний поділ електричної мережі та вибір режиму її експлуатації; вибір схем комутації; застосування обладнання з підвищеним електричним опором; використання швидкодіючих комутаційних апаратів; зміна стану нейтралі елементів мережі та вмикання в мережу ділянок з електромагнітним перетворенням параметрів режиму системи.

Структуру та схеми електричних з'єднань елементів СЕП вибирають *на стадії проектування або реконструкції*. Під час прийняття рішень за основу слід брати наступні принципи:

– *поздовжній розподіл мереж однакового рівня напруги з розміщенням об'єкта електропостачання на територіально різних ділянках, де їх зв'язок відбувається через мережу більш високої напруги (рис. 14.1,а);*

- поперечний розподіл мереж однакової напруги територіально сполучених, але зв'язаних *мережею вищої напруги* (рис. 14.1,б);
- роздільне живлення вузлів навантаження від джерел електричної енергії з їх паралельною роботою через зв'язки в електричній мережі з використанням блокових з'єднань "*генератор – трансформатор – лінія*";
- розукрупнення приймальних підстанцій і поетапний розвиток СЕП шляхом впровадження глибоких введів високої напруги;
- застосування роздільної роботи основних елементів СЕП (*ліній, трансформаторів*) на всіх *ступенях розподілу* електричної енергії;
- використання розімкнених розподільних мереж з широким *вживанням струмоводів, шинних і кабельних магістральних ліній*, що дає змогу скористатися *струмообмежувальною дією самої мережі*.

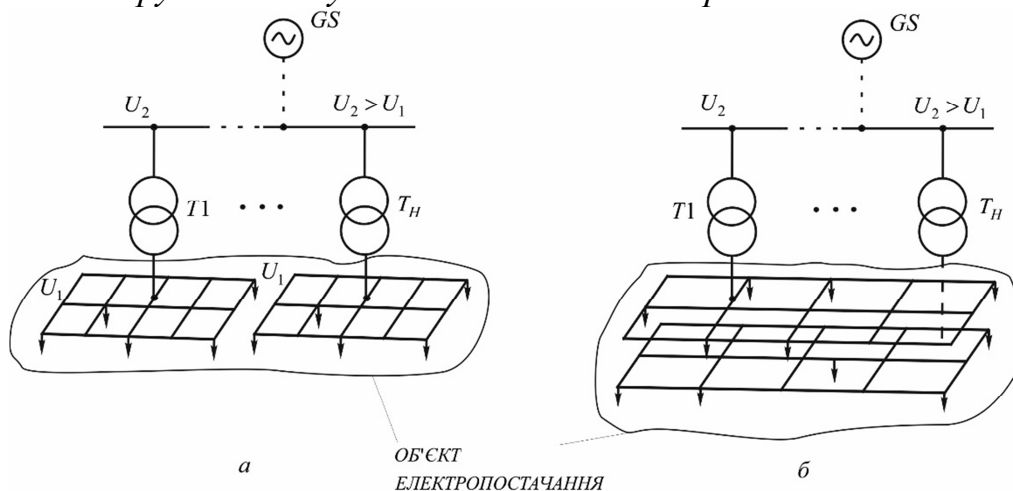


Рис. 14.1. Розподіл електричної мережі: а – поздовжній; б – поперечний

При складанні схем електропостачання необхідно брати до уваги важливі вимоги, що ставляться до СЕП.

Максимальне наближення джерел живлення до електроприймачів. У тривалих режимах використовується *централізоване електропостачання* від ЕЕС одним або кількома приймальними пунктами. Для СЕП промислових підприємств *характерна наявність кількох джерел живлення* місця КЗ: власні джерела електричної енергії у вигляді генераторів ТЕС, через підстанції зв'язку з районною енергетичною системою; синхронні компенсатори; синхронні та асинхронні двигуни, що перейшли на генераторний режим.

Пайова участь кожного джерела в живленні місця КЗ залежить *від його потужності та електричної віддаленості*. Наближення основного джерела живлення свідчить про зменшення кількості проміжних трансформацій в СЕП, збільшення числа елементів мережі, розрахованих на вищу напругу, а відповідно – і на менші робочі струми та струми КЗ. Усі джерела живлення СЕП підприємства з метою резервування пов'язані між собою струмоводами, КЛ або ПЛ знаходяться на *живильній вторинній напрузі*. Поряд з резервуванням елементів у цьому випадку переважають зв'язки на вторинній напрузі, оскільки дають можливість отримувати менший рівень струмів КЗ.

Секціювання всіх ступенів розподілу електричної енергії в СЕП. Ця вимога тісно пов'язана з вибором кількості та потужності трансформаторів головних понижувальних підстанцій (ГПП) і трансформаторних пунктів (ТП), кількості та пропускної потужності живильних ліній. Така побудова СЕП дозволяє збільшувати електричний опір мережі перебігу струму КЗ, запобігти чи локалізувати місце КЗ.

Побудова і вибір конфігурації електричної мережі (радіальної, магістральної, радіально-магістральної) повинні обґрунтовуватися разом з такими основними чинниками, як надійність, втрати потужності та енергії, витрати кольорового металу, ще й шкалою використання перерізу провідників, вибраних за рівнем струму КЗ.

Використання ступеневого струмообмеження в схемі електропостачання, при якому струмообмежувальні пристрої або елементи мережі з струмообмежувальною дією встановлюють на кількох послідовних ступенях розподілу електричної енергії. Щодо цього найбільш характерні схеми електропостачання вугільних шахт, в яких перший ступінь обмеження потужності КЗ – це її зниження на ГПП шахти, а другий – на лініях, що живлять навантаження підземних споживачів, де потужність КЗ обмежена Правилами безпеки на рівні 50...100 МВ·А.

Стационарний або автоматичний розподіл мереж здійснюється звичайно в системах зовнішнього електропостачання в зв'язку із збільшенням кількості та потужності джерел електричної енергії як в енергетичній системі, так і на власних ТЕС. Необхідність розподілу мережі виникає тоді, коли рівень струму КЗ у вузлах навантаження перевищує допустимий за параметрами експлуатованого електрообладнання. Зауважимо, що розподіл мережі суттєво впливає на експлуатаційні режими, стійкість та надійність роботи електричної системи, а також на втрати потужності та енергії в мережах.

Застосування електрообладнання з підвищеним електричним опором передбачає встановлення як загальномережних, так і спеціальних елементів. При проектуванні СЕП можна спрямовано вибирати елементи мережі з більшим реактивним чи активним опором, змінюючи кількість та потужність трансформаторів, застосовуючи їх з підвищеною відносною напругою КЗ, ПЛ та струмоводи із збільшеною відстанню між фазами, протяжні шинопроводи і т.п. До спеціального електрообладнання належать трансформатори та автотрансформатори з розщепленими обмотками, одноланцюгові та здвоєні реактори, струмообмежувальні пристрої резонансного, трансформаторного чи реакторного типів, призначення яких – нарощувати опір струму, який більший за значення струму робочого режиму.

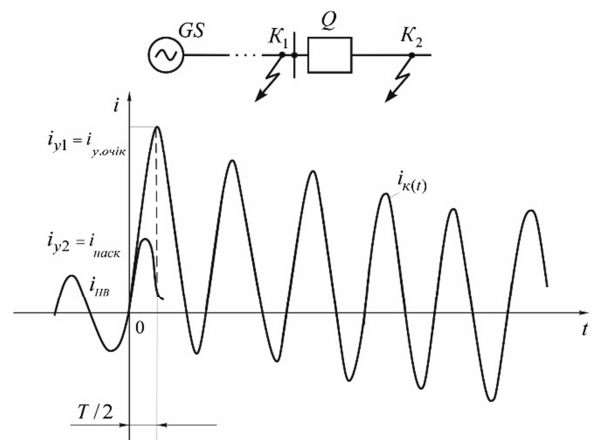


Рис. 14.2. Характер обмеження комутаційним апаратом Q електродинамічного впливу струму КЗ від значення i_{y1} до значення i_{y2}

Струмообмежувальна дія комутаційних апаратів, що виконують цю функцію за амплітудою та тривалістю вимикання струму КЗ, з'являється за час швидкодії, менший періоду зміни струму. Електродинамічний вплив струму КЗ зменшується при використанні апаратів, час дії яких до 5 мс (рис. 14.2). Як такі апарати можуть застосовуватись безінерційні запобіжники, тиристорні вимикачі з примусовою комутацією, обмежувачі ударного струму вибухової дії, а також деякі типи автоматичних вимикачів напругою до 1 кВ. При тривалості КЗ понад 5 мс виявляється тепловий вплив струму, який може бути зменшений прискореним вимиканням пошкодженого кола.

Досить суттєвий чинник зменшення значень струмів КЗ, що перебігають у контурах "провідники – земля", – це зміна стану нейтралі елементів електричної мережі. Заземлення нейтралей через додаткові опори призводить до зростання еквівалентного опору нульової послідовності. Цієї ж мети досягають заміною трансформаторів у вузлових точках мережі трансформаторами такої потужності із з'єднанням фазних обмоток за схемою "зірка – зірка". Заземлення нейтралі полегшує розв'язання інших важливих завдань проектування (рівнів ізоляції, вимог безпеки, рівнів перенапруг, надійності), але підвищує значення струму КЗ на землю. Тому вибір та зміна стану нейтралі мереж або її елементів повинні здійснюватися комплексно, з етапом техніко-економічного обґрунтування.

Електромагнітне перетворення параметрів режиму СЕП (режиму навантаження) означає передачу потужності споживачам з виконанням операцій *випрямлення, інвертування та зміни частоти струму*, а також перетворень трифазної системи напруг на однофазну, на систему струму тощо. В СЕП такі перетворення параметрів електричної енергії – *однобічні й виконуються переважно для живлення спеціальних груп електроприймачів (прокатних станів, зварювальних машин, промислового та міського транспорту)*. Елементи електрообладнання, що реалізують ці операції, відіграють роль розв'язувальних пристроїв усунення живлення місця КЗ від увімкнених за ними вузлів навантаження та місцевих джерел (в аварійних ситуаціях усунена зворотна передача енергії в живильну мережу).

При перетворенні в мережі системи напруги на систему струму режим КЗ в останній – неаварійний, а нормальний режим роботи (мережі групових зварювальних постів, мережі живлення електродугових печей, вторинні кола релейного захисту). Таке ж перетворення електричних параметрів режиму використовують і для передачі та розподілу енергії в системі рудникового транспорту з безконтактними електровозами.

Таким чином, потужність та струми КЗ у СЕП обмежуються *правильним проектуванням схем підстанцій та електричних мереж*. Підбір способу обмеження рівня потужності та струмів КЗ – неоднозначний і практично являє собою сукупність заходів, що комплексно вирішують цілу низку питань вибору параметрів електрообладнання та режимів роботи на основі техніко-економічних розрахунків.

Технічні засоби обмеження струмів короткого замикання

Реалізація різних способів обмеження струмів КЗ, окрім прийняття при проектуванні та експлуатації рішень щодо структури, схем з'єднання елементів та режимів експлуатації СЕП, *передбачає спеціальні* технічні заходи. Останні являють собою застосування окремого електрообладнання, яке завдяки конструктивному виконанню *безпосередньо обмежує значення чи тривалість дії* струму КЗ або *використовується в схемах з'єднання* елементів, що виконують у сукупності саме цю функцію. До засобів належать:

- апарати і пристрої, що реалізують автоматичний розподіл мережі;
- силові трансформатори і автотрансформатори, у тому числі з особливими конструкцією та з'єднанням фазних обмоток;
- струмообмежувальні елементи та пристрої;
- струмообмежувальні комутаційні апарати;
- пристрої зміни стану нейтралі силових елементів.

Автоматичний розподіл мережі можна використовувати в зовнішньому електропостачанні підприємств у мережах напругою 35 кВ та вище. Така операція здійснюється із застосуванням *пристроїв протиаварійної автоматики і комутаційних апаратів, встановлених на потужних відгалуженнях, між секціями розподільних пристроїв та на вводах.*

До складу засобів протиаварійної автоматики входять захист, що реагує на появу КЗ, пристрої системи автоматичного послідовного вимикання комутаційних апаратів, пристрої автоматичного частотного розвантаження, пристрої АПВ та АРЗ. Система послідовного вимикання струму КЗ повинна мати високу надійність та швидкодію (при вимиканні струму КЗ і при відновленні початкового режиму), а її комутаційні апарати – витримувати повний наскрізний струм КЗ та вмикання без пошкоджень на КЗ в аварійному приєднанні.

Трансформатори і автотрансформатори можна робити з розщепленою обмоткою НН. Частини такої обмотки розміщують симетрично відносно обмотки ВН, мають самостійні виводи і допускають виконання на довільний розподіл навантаження. Для обмеження значень несиметричних струмів КЗ істотну роль відіграє схема з'єднання фазних обмоток трансформаторів (автотрансформаторів). Оскільки в схему заміщення нульової послідовності вмикають лише ті вітки, якими циркулюють струми нульової послідовності, то до неї не потрапляють ділянки електричної мережі за обмотками, з'єднаними на трикутник.

Струмообмежувальні реактори, що вмикають у різних точках електричної мережі напругою 6–220 кВ, становлять додаткові реактивні опори. Їх призначення – знижувати значення струмів КЗ за реактором і зберегти необхідний рівень залишкової напруги у вузлових точках мережі перед реактором.

Залежно від місця ввімкнення реактора розрізняють струмообмеження приєднань (рис. 14.3,а), вводів (рис. 14.3,б), секцій (рис. 14.3,в) та їх сполучень (рис. 14.3,г). За схемою вмикання розрізняють реактори одноланцюгові чи здвоєні (*розщеплені*). Відмінність здвоєного реактора від одноланцюгового – у

наявності середнього виводу обмотки, в зв'язку з чим можливі різні схеми вмикання та використання. *Струмообмежувальна дія реактора характеризується індуктивним опором і номінальним струмом.*

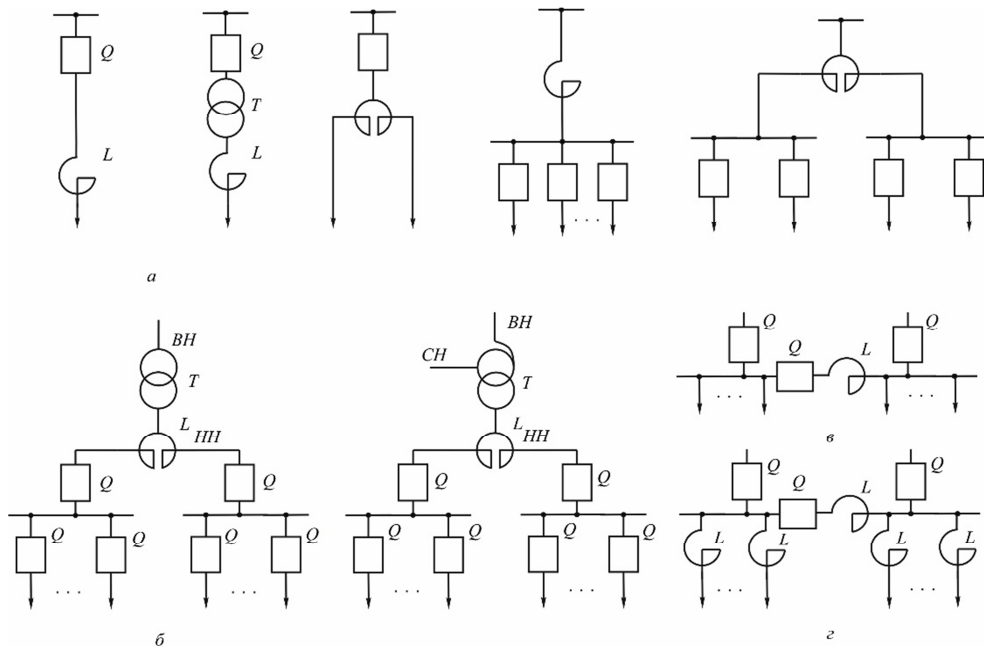


Рис. 14.3. Схеми реактування:

а – відгалужень; б – введів; в – секцій; г – комбінована

Для зменшення вартісних витрат необхідно використовувати *групові реактори* замість індивідуальних в приєднаннях, вводах та схемах комутації ГПП. Разом з тим у схемах, які мають групові реактори на значний номінальний струм і з великим реактивним опором, можливі коливання напруги через зміну їх навантаження. Цей недолік можна ліквідувати використанням здвоєних реакторів з рівномірним навантаженням їх віток. При різкозмінному навантаженні коливання напруги зменшуються частково.

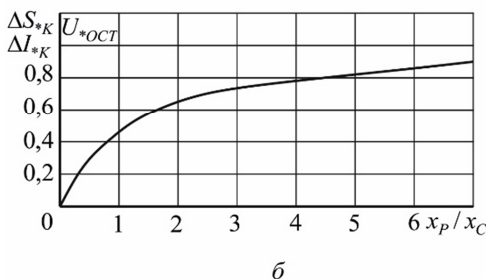
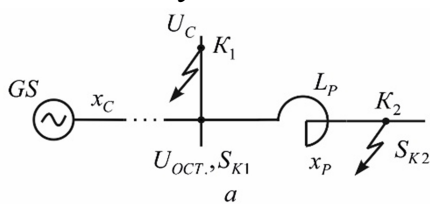


Рис. 14.4. До розгляду ефективності використання одноланцюгового реактора: а - схема вмикання; б - характеристики застосування

Ефективність використання одноланцюгового реактора залежить від параметрів електричної мережі та потужності КЗ, що надходить з джерела живлення до точки вмикання (рис. 14.4,а). Відносно зниження значень потужності та струму КЗ розраховують за формулою:

$$\Delta S_{*к} = (S_{к1} - S_{к2}) / S_{к1} \equiv \Delta I_{*к} = (I_{к1} - I_{к2}) / I_{к1}, \quad (14.8)$$

яка після підстановки $I_{к1} = I_{\bar{0}} / x_c$; $I_{к2} = I_{\bar{0}} / (x_c + x_p)$ набуває вигляду:

$$\Delta S_{*к} \equiv \Delta I_{*к} = (x_p / x_c) / (1 + x_p / x_c) \quad (14.9)$$

Відношення x_p / x_c має обмежений діапазон значень і залежить від параметрів, реактивність яких перебуває в межах 3...16 %, а також від

параметрів зв'язку вузла мережі з джерелом живлення (%) $x_c = 100S_c/S_k$, де S_c – перепускна потужність елементів мережі районної енергетичної системи.

Струмообмежувальна дія реактора знижується із збільшенням потужності приймальних пунктів електричної енергії і підвищується з їх розукрупненням за кількістю та потужністю трансформаторів. Реактор вибирають за номінальними значеннями напруги та струму, індуктивним опором і перевіряють за динамічною та термічною стійкістю до струму КЗ, а при необхідності – за рівнем залишкової напруги в попередньому вузлі мережі.

Найперша дія при виборі реактора – визначення його індуктивного опору. Виходячи з потрібного рівня потужності КЗ за реактором $S_{k2} = S_{к,необх}$, необхідний індуктивний опір розраховують за формулами (у відносних або іменованих одиницях виміру):

$$x_{*p} = (S_{\bar{\sigma}}/S_{k2} - x_{*(\bar{\sigma})c})IU_{\bar{\sigma}}/(U_c I_{\bar{\sigma}}); \quad (14.10)$$

$$x_p = x_{*p}U_c/(\sqrt{3}I),$$

де I, U_c – робочий струм та напруга мережі відповідно до тривалого режиму роботи реактора.

За струмом, напругою мережі та індуктивним опором вибирають реактор з ближчим (більшим) стандартним значенням $x_{p,ном}$, який перевіряють (якщо треба) за значенням залишкової напруги:

$$U_{ост} \geq 0,6U_c. \quad (14.11)$$

Рівень залишкової напруги залежить від відношення опорів (рис. 14.4,б):

$$U_{*ост} = U_{ост}/U_c = \sqrt{3}I_{k2}x_{p,ном}/U_c = 1/(x_c/x_{p,ном} + 1) \quad (14.12)$$

або (%)

$$U_{ост} = x_{p,ном}I_{k2}/I_{p,ном},$$

де $x_{p,ном}$ (%), $I_{p,ном}$ – параметри вибраного реактора; I_{k2} – уточнене значення струму, що відповідає стандартному індуктивному опоріві реактора та його номінальному струму.

Якщо умова (14.11) не виконується, то нове розрахункове значення (%) слід визначити, виходячи з необхідного рівня залишкової напруги $U_{*ост,необх}$, за формулою:

$$x_p = 100U_{*ост,необх}x_{*(\bar{\sigma})c}IU_{\bar{\sigma}}/(U_c(1-U_{*ост,необх})I_{\bar{\sigma}}). \quad (14.13)$$

За значенням x_p вибирають реактор з найближчим стандартним значенням опору, перераховують струм КЗ за вибраним реактором і перевіряють відповідність його параметрів умовам електродинамічної та термічної стійкостей.

Секційні реактори обмежують значення струму КЗ на збірних шинах і відгалуженнях. Порівняно з лінійними реакторами секційні мають меншу струмообмежувальну дію, оскільки розраховуються на більші номінальні струми (між секціями при порушенні нормального режиму їх роздільної роботи). Секційні реактори вибирають за номінальною напругою, найбільшим струмом з робочих струмів секцій та індуктивним опором. Спочатку задаються опором реактора і змінюють перевірними розрахунками до отримання значення

струму КЗ, допустимого за параметрами встановленого електрообладнання. За значеннями електродинамічної і термічної стійкостей секційні реактори не перевіряють.

Здвоєні реактори конструктивно характеризують індуктивністю віток $L_1 = L_2 = L_B$ та коефіцієнтом зв'язку частин розщепленої обмотки:

$$k_{3\phi} = M / \sqrt{L_1 L_2} = M / L_B = \omega M / x_{НОМ}, \quad (14.14)$$

де M – взаємна індуктивність частин обмотки реактора.

Схема заміщення здвоєного реактора являє собою трипроменеву зірку з опорами променів x_1, x_2, x_3 , однак залежно від схеми ввімкнення такий реактор працює в різних струмообмежувальних режимах та з неоднаковими результуючими опорами:

– в одноланцюговому режимі:

$$x_p = x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) - x_{НОМ} k_{3\phi} = x_{НОМ}; \quad (14.15)$$

– у поздовжньому режимі:

$$x_p = x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) + x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) = 2x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}); \quad (14.16)$$

– у наскрізному режимі при однакових струмах у вітках:

$$x_p = x_{НОМ} - x_{НОМ} k_{3\phi} = x_{НОМ} (1 - k_{3\phi}). \quad (14.17)$$

У комбінованому режимі джерела живлення розміщені з боку кожної вітки реактора. Якщо КЗ проходить з боку вітки 2, то результуючий опір реактора:

$$x_p = 0,5x_{НОМ} (1 - k_{3\phi}), \quad (14.18)$$

якщо ж з боку вітки 1 або 3, то при $x_{2,рез} > k_{3\phi} x_{НОМ}$:

$$x_p = x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) (x_{2,рез} - k_{3\phi} x_{НОМ}) / [x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) + x_{2,рез} - k_{3\phi} x_{НОМ} + x_{НОМ} (1 + k_{3\phi})], \quad (14.19)$$

а при $x_{2,рез} < k_{3\phi} x_{НОМ}$:

$$x_p = x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}). \quad (14.20)$$

Вибір здвоєного реактора аналогічний вибору одноланцюгового реактора при $x_{p,НОМ} \equiv x_{НОМ}$. Значення струму кожної вітки здвоєного реактора повинно бути не меншим 0,675 номінального струму обмотки трансформатора або сумарного струму навантаження, передбачається рівномірний розподіл навантаження між вітками реактора.

Недолік здвоєних реакторів – у можливості підвищення напруги на слабо навантаженій вітці при роботі в одноланцюговому та наскрізному режимах. Напруга на такій вітці за рахунок магнітного зв'язку частин обмотки реактора містить складову – е.р.с., що індукується струмом КЗ навантаженої вітки. При КЗ на другій вимкненій вітці реактора з'явиться напруга:

$$U_3 = \sqrt{3} x_{НОМ} (1 + k_{3\phi}) I_K. \quad (14.21)$$

Ця напруга залежить від реактивності вітки реактора, його номінального струму та коефіцієнта зв'язку, значення якого – у межах 0,4...0,63.

Наявність значного опору у струмообмежувальних реакторів призводить до додаткових втрат напруги, потужності та енергії. *Ідеальною вважається*

нелінійна характеристика опору зведеного реактора, при якій в нормальних режимах роботи він найменший в (аварійних – найбільший).

Серед розробок – відомі конструкції керованих і насичуваних реакторів, струмообмежувальних пристроїв трансформаторного та резонансного типів.

У керованих реакторах опір змінюється підмагнічуванням магнітопроводу, магнітним потоком від керуючих обмоток. Результуючим опором реактора можна також керувати, використовуючи тиристорні вимикачі на частинах його обмотки.

У реакторах, які насичуються, опір зростає завдяки змінам ступеня насиченості магнітопроводу при збільшенні струму КЗ, що перебігає через реактор.

У струмообмежувальних пристроях трансформаторного типу застосовується послідовне вмикання опору в контур первинної обмотки трансформатора. Їх результуючий опір змінюється шляхом керування режимом роботи вторинної обмотки трансформатора за допомогою нелінійних опорів або тиристорних вимикачів.

Дія струмообмежувальних пристроїв резонансного типу базується на явищі резонансу напруг. Збільшення їх опору при появі КЗ – наслідок порушення умов резонансу напруги з причини зміни частоти струму в перехідному процесі. Розлад резонансу напруг відбувається з використанням порогових елементів, насичувальних дроселів, тиристорних вимикачів та обмежувачів ударного струму.

Струмообмежувальні комутаційні апарати вміщують функції обмеження найбільших значень струмів КЗ і захисту від дії надструмів на електроустановки їх швидким вмиканням. До них належать швидкодіючі струмообмежувальні запобіжники, обмежувачі ударного струму та спеціальні автоматичні вимикачі напругою до 1 кВ.

Оптимізація рівня струму короткого замикання

Система електропостачання – невелика частина ЕЕС, при проектуванні якої визначається рівень потужності КЗ. Якщо СЕП власних джерел електричної енергії не має, то найбільше значення потужності КЗ буде на межі до живильної енергетичної системи. З наявністю власних джерел найбільше значення потужності КЗ визначається їх потужністю та потужністю КЗ, що надходить від ЕЕС, а також електричною віддаленістю джерел електричної енергії і точки КЗ.

Рівень потужності КЗ у вузлах навантаження залежить від структури СЕП, параметрів її мереж та складу електроприймачів. Установлення оптимального рівня потужності КЗ кожного вузла СЕП передбачає аналіз ширшої низки показників, до яких належать: *технічні та вартісні показники* електрообладнання, *провідників* і струмообмежувальних пристроїв, *категорія* безперервності електропостачання та його надійність, *стійкість* навантаження, *працездатність* засобів захисту, *якість* напруги живлення споживачів, *пуск і самозапуск* потужних електродвигунів, *втрати* потужності та енергії в мережах чи від перерв в електропостачанні.

Урахування дії чинників, що визначають оптимальний рівень потужності КЗ, – суперечливі. З одного боку, зниження найбільших значень потужності КЗ у вузлах навантаження дозволяє встановлювати простіше та дешевше електрообладнання, зменшувати переріз провідників, застосовувати прості рішення за схемами розподілу електричної енергії з використанням пристроїв системної автоматики АРЗ, АПВ і зменшувати втрати від аварійного впливу струмів КЗ за рахунок їх локалізації. При цьому, однак, зростають витрати на додатково встановлене спеціальне обладнання та струмообмежувальні пристрої, зниження різних видів перенапруг та втрат від можливих перерв в електропостачанні.

З другого боку, отримання достатнього рівня напруги для пуску та самозапуску електродвигунів, обмеження коливань і відхилень напруги у вузлах електропостачання з різкозмінним ударним навантаженням, обмеження рівня несинусоїдності напруги, зниження впливу несиметрії навантаження, забезпечення надійності роботи засобів захисту вимагають збереження більших значень потужності КЗ.

При проектуванні СЕП може визначитися техніко-економічне завдання зниження рівня потужності КЗ у конкретних вузлах до оптимальних. Її *цільова функція – зведені витрати*.

Критерій оптимального рівня потужності КЗ – мінімум зведених витрат. Для мінімізації цільової функції зведених витрат доцільно використовувати метод дискретної оптимізації. Останній дає змогу перейти від оптимізації функції багатьох дискретно змінюваних до досліджень на екстремум функції $Z(S_k)$ при врахуванні обмежень за різними параметрами (дискретної шкали потужностей електрообладнання, шкали номінальних напруг, нормованих показників якості електричної енергії, допустимих втрат потужності та енергії, рівнями перенапруг, максимальної потужності КЗ та ін).

Існування великої кількості змінних та обмежень значно звужують можливості пошуку глобального мінімуму функції зведених витрат. Тому на практиці частіше застосовують числові математичні моделі оптимізації рівнів потужності КЗ, які можуть бути розроблені для конкретних вузлів СЕП з виділенням групи найсуттєвіших змінних, залежних від параметрів режиму КЗ.

Координація рівня струмів короткого замикання

Координація рівня струмів КЗ – це *узгодження* їх значень у різних вузлах СЕП з параметрами електрообладнання або значеннями окремих параметрів режиму. За своєю постановкою вона являє собою важливе техніко-економічне завдання, від вирішення якого залежать енергетичні та вартісні характеристики СЕП.

При централізованому електропостачанні промислових підприємств, міст та об'єктів сільського господарства це завдання постає при значних значеннях струмів КЗ на межі з живильною енергетичною системою. Його вирішення полягає в поступовому зниженні рівня струму КЗ, створюваного джерелами

електричної енергії. Це виконується при проектуванні СЕП, її експлуатації та подальшому розвитку або реконструкції.

Під час проектування СЕП для вирішення проблеми координації струмів КЗ початковими стають дані про джерела живлення та склад електроприймачів. На основі запланованого територіального розміщення споживачів відомими вважаються передбачені джерела електричної енергії з такими характеристиками:

- встановлені потужності генеруючих джерел промислового району з перспективою розвитку на 8...10 років;
- потужності або струми КЗ, генеровані джерелами з урахуванням розвитку не менш як на 5 років з моменту введення в експлуатацію СЕП;
- робоча напруга районної ЕЕС;
- параметри ЛЕП між ЕЕС і СЕП.

На етапі експлуатації СЕП необхідність вирішення питань координації струмів КЗ виникає при зміні схеми електропостачання, підвищенні потужності генеруючих джерел, потужності або перепускної потужності основних елементів, введенні обмежень на режим роботи основного електрообладнання, збільшенні щільності навантаження та завантаження мереж. Зазначимо, що нові значення струмів КЗ повинні узгоджуватися з параметрами встановленого електрообладнання та мереж.

Координація струмів КЗ досягається:

- стаціонарним або автоматичним розподілом мережі;
- застосуванням струмообмежувальних одноланцюгових і здвоєних реакторів чи інших струмообмежувальних пристроїв;
- використанням комутаційних апаратів підвищеної стійкості до впливу струмів КЗ;
- розукрупненням трансформаторних підстанцій за потужністю трансформаторів і секцій шляхом розміщення трансформаторів з розщепленими обмотками або здвоєних реакторів;
- зміною стану нейтралі мережі розземленням частини нейтралей трансформаторів, заземлення нейтралей через резистори, реактори та струмообмежувальні пристрої;
- електричним розподілом мережі встановленням розподільних трансформаторів.

В умовах наступного розширення і розвитку СЕП узгодження рівнів струмів КЗ переслідує таку ж мету, як і при експлуатації СЕП. Додатковий раціональний захід – будівництво нових приймальних пунктів зв'язку з ЕЕС і ПГВ з поперечним та поздовжнім розподілом мереж для покриття підвищення електричних навантажень.

На всіх етапах координації рівня струмів КЗ на різних ступенях розподілу енергії їх аналіз використовують для обґрунтування технічної необхідності створення нового та модернізації існуючого електрообладнання. Контроль струмів КЗ у вузлах навантаження та аналіз динаміки їх зміни – важливий чинник надійності електропостачання в процесі експлуатації.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Основне джерело в електропостачанні промислових підприємств – електроенергетична система.

2. Тенденції зростання кількості та потужності джерел електричної енергії в ЕЕС, наближення джерел живлення до споживачів, збільшення числа і потужності синхронних та асинхронних двигунів у вузлах навантаження означають одночасно підвищення рівня потужності і струмів КЗ на шинах знижувальних підстанцій та в розподільних електричних мережах СЕП.

3. Аналіз електромагнітних перехідних процесів з оцінкою їх якості необхідний для проектування і правильної експлуатації СЕП.

4. *Тривалість перехідного процесу* – інтервал часу, протягом якого СЕП переходить з одного стійкого стану до іншого.

5. При перехідних процесах, які виникають внаслідок раптових порушень нормального режиму, звичайно прагнуть скоротити час аварійного режиму.

6. *Характер перехідного процесу* оцінюють за зміною струму протягом певного часу.

7. Характер електромагнітного перехідного процесу залежить від потужності джерел електричної енергії, параметрів електричних мереж, наявності на генераторах пристроїв АРЗ, встановлення в електричних мережах пристроїв АПВ.

Небезпечні наслідки для обладнання СЕП оцінюють:

- електродинамічною стійкістю елементів СЕП;
- термічною стійкістю.

Вплив параметрів аварійного перехідного процесу на нормальні режими роботи СЕП та її елементів оцінюють:

- коефіцієнт несинусоїдності;
- коефіцієнт зворотної послідовності;
- коливання напруги;
- коливання частоти.

Вартість додаткових заходів для поліпшення необхідних характеристик перехідного процесу в СЕП оцінюють за додатковим капітальним вкладенням.

В основі якісної оцінки всіх показників лежать струми та потужності КЗ.

Рівні струмів та потужності КЗ характеризують очікувані умови роботи електрообладнання СЕП в аварійних ситуаціях. Це не лише ставить жорсткіші вимоги до його технічних характеристик, а й свідчить про відповідне зростання вартісних показників.

8. При проектуванні СЕП вирішується техніко-економічне завдання щодо обмеження рівнів струмів та потужності КЗ до значень, допустимих параметрами економічно вигідного електрообладнання.

9. *Максимальне наближення джерел живлення до електроприймачів* свідчить про зменшення кількості проміжних трансформацій в СЕП, збільшення числа елементів мережі, розрахованих на вищу напругу, а відповідно – і на менші робочі струми та струми КЗ.

10. Секціювання всіх ступенів розподілу електричної енергії в СЕП дозволяє збільшувати електричний опір мережі перебігу струму КЗ, запобігти чи локалізувати місце КЗ.

11. Побудова і вибір конфігурації електричної мережі (радіальної, магістральної, радіально-магістральної) повинні обґрунтовуватися разом з такими основними чинниками, як надійність, втрати потужності та енергії, витрати кольорового металу.

12. Використання ступеневого струмообмеження в схемі електропостачання передбачає струмообмежувальні пристрої або елементи мережі з струмообмежувальною дією. Їх встановлюють на кількох послідовних ступенях розподілу електричної енергії.

13. Суттєвий чинник зменшення значень струмів КЗ, що перебігають у контурах "провідники – земля", – зміна стану нейтралі елементів електричної мережі.

14. Потужність та струми КЗ у СЕП обмежуються правильним проектуванням схем підстанцій та електричних мереж.

15. Підбір способу обмеження рівня потужності та струмів КЗ – неоднозначний і практично являє собою сукупність заходів.

16. Для обмеження значень несиметричних струмів КЗ істотну роль відіграє схема з'єднання фазних обмоток трансформаторів (автотрансформаторів).

17. Струмообмежувальні реактори, що вмикають у різних точках електричної мережі напругою 6–220 кВ, становлять додаткові реактивні опори.

18. Призначення ректорів – знижувати значення струмів КЗ за реактором і зберегти необхідний рівень залишкової напруги у вузлових точках мережі перед реактором.

19. Залежно від місця ввімкнення реактора розрізняють струмообмеження приєднань, вводів, секцій та їх сполучень.

20. За схемою вмикання розрізняють реактори одноланцюгові чи здвоєні (розщеплені).

21. Струмообмежувальна дія реактора характеризується індуктивним опором і номінальним струмом.

22. Для зменшення вартісних витрат необхідно використовувати групові реактори замість індивідуальних в приєднаннях, вводах та схемах комутації ГПП.

23. Ефективність використання одноланцюгового реактора залежить від параметрів електричної мережі та потужності КЗ, що надходить з джерела живлення до точки вмикання.

24. Реактор вибирають за номінальними значеннями напруги та струму, індуктивним опором і перевіряють за динамічною та термічною стійкістю до струму КЗ, а при необхідності – за рівнем залишкової напруги в попередньому вузлі мережі.

25. Секційні реактори обмежують значення струму КЗ на збірних шинах і відгалуженнях.

26. Порівняно з лінійними реакторами секційні мають меншу струмообмежувальну дію, оскільки розраховуються на більші номінальні струми.

27. Секційні реактори вибирають за номінальною напругою, найбільшим струмом з робочих струмів секцій та індуктивним опором.

28. За значеннями електродинамічної і термічної стійкостей секційні реактори не перевіряють.

29. Здвоєні реактори конструктивно характеризують індуктивністю віток та коефіцієнтом зв'язку частин розщепленої обмотки.

30. Залежно від схеми ввімкнення здвоєний реактор працює в різних струмообмежувальних режимах та з неоднаковими результуючими опорами:

- в одноланцюговому режимі;
- у поздовжньому режимі;
- у наскрізному режимі при однакових струмах у вітках.

31. *Недолік здвоєних реакторів* – у можливості підвищення напруги на слабо навантаженій вітці при роботі в одноланцюговому та наскрізному режимах.

32. У реакторах, які насичуються, опір зростає завдяки змінам ступеня насиченості *магнітопроводу* при збільшенні струму КЗ, що перебігає через реактор.

33. Дія струмообмежувальних пристроїв резонансного типу базується на явищі резонансу напруг. Збільшення їх опору при появі КЗ – наслідок порушення умов резонансу напруги з причини зміни частоти струму в перехідному процесі.

34. Рівень потужності КЗ у вузлах навантаження залежить від структури СЕП, параметрів її мереж та складу електроприймачів.

35. При проектуванні СЕП може визначитися техніко-економічне завдання зниження рівня потужності КЗ у конкретних вузлах до оптимальних. Її цільова функція – зведені витрати.

36. Критерій оптимального рівня потужності КЗ – мінімум зведених витрат.

37. Координація рівня струмів КЗ – це узгодження їх значень у різних вузлах СЕП з параметрами електрообладнання або значеннями окремих параметрів режиму.

Тестові питання по темі 14

1. Які параметри визначають якість електромагнітних перехідних процесів, як їх оцінюють?
2. Як оцінити способи обмеження аварійних струмів, які характеристики та умови їх застосування?
3. Як зміна стану нейтралі елементів електричної мережі впливає на обмеження аварійних струмів?
4. Що означає електромагнітне перетворення параметрів режиму СЕП?
5. Як оцінюють технічні засоби обмеження струмів короткого замикання?

6. Як оцінити ефективність використання одноланцюгового реактора? Як визначити основні параметри вибору цього реактора?
7. Оцінити можливі режими та відповідні параметри здвоєних реакторів.
8. Які можливі схеми заміщення здвоєних реакторів? Як це впливає на струмообмеження?
9. Основні принципи оптимізації рівня аварійного струму.
10. У чому суть координації рівня аварійних струмів?

ТЕМА 15

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

Загальні вимоги

Комутації, що відбуваються в електричних системах (ЕС), супроводжуються зміною запасів електричної енергії, зосередженої в індуктивних та ємнісних елементах електроустаткування. Ці зміни супроводжуються виникненням перехідних процесів, які представляються у вигляді змін у часі струмів, напруги й інших параметрів, що характеризують фізичні процеси, які відбуваються. За рідкісним виключенням (електрична дуга, імпульсні процеси) між напругою і струмами в перехідних процесах зберігаються відомі з теоретичної електротехніки співвідношення.

До останніх десятиліть електромагнітні процеси розглядалися в промислових електричних мережах і мережах енергосистем з точки зору виникнення значних порушень: статичної й динамічної стійкості, струмів КЗ і т.п.

Проблема аналізу і розрахунку перехідних процесів у СЕП є часткою загальної проблеми електромагнітної сумісності, сформульованої й оформленої науковою дисципліною «Електромагнітна сумісність».

У попередніх темах розглянуто електромагнітні перехідні процеси в промислових системах електропостачання (частота 50 Гц). Як правило, в цьому випадку немає взаємного впливу окремих видів електроустаткування. Електромагнітне поле характеризує електромагнітні умови, представлені у вигляді різного роду електромагнітних перешкод (ЕМП). Відповідно окремі види електроустаткування є або генераторами перешкод (джерелами *емісії перешкод*), або об'єктами їх впливу, що характеризує їхню електромагнітну сумісність.

Тривала дія ЕМП на ізоляцію електроустаткування може привести до її ушкодження і, як наслідок, до виникнення КЗ. Проникнення ЕМП до ланцюга систем автоматики, зв'язку і систем захисту викликає збої в роботі цих систем (*порушення електромагнітної сумісності*). Це супроводжується помилковою роботою систем захисту, виникненням автоколивань в основних мережах СЕП, порушенням статичної стійкості й іншими негативними явищами.

Тому вивчення електромагнітних перехідних процесів у СЕП підприємств повинне включати не лише розрахунки струмів КЗ і стійкості паралельної роботи електростанцій електричних мереж, але й питання розрахунку і аналізу ЕМП, тобто комплекс питань електромагнітної сумісності.

Електромагнітні перешкоди в СЕП підприємств

СЕП підприємства є джерелом великої кількості електромагнітних перешкод. До них відносяться лінії електропередачі, розподільні пристрої, шинопроводи, кабелі, а також технічні засоби автоматизації, управління й захисту.

Виникнення аварійних (перехідних) електромагнітних процесів обумовлене, в першу чергу, короткими замиканнями в системах електропостачання або комутаційними перемикаваннями. Вони є джерелами коливальних і аперіодичних перешкод, що випадково виникають у часі, та характеризуються, як правило, широким частотним спектром.

Нормальні (сталі) електромагнітні процеси, для яких характерні перешкоди у зоні низьких, середніх і високих частот (від декількох Гц до 100 ГГц), створюються усіма енергетичними установками. На рис. 15.1 приведено частотні спектри імпульсних і періодичних електромагнітних перешкод в електротехнічних установках. Електротехнічні пристрої є не лише генераторами електромагнітних перешкод, а й об'єктом дії інших перешкод як в аварійних, так і нормальних режимах.

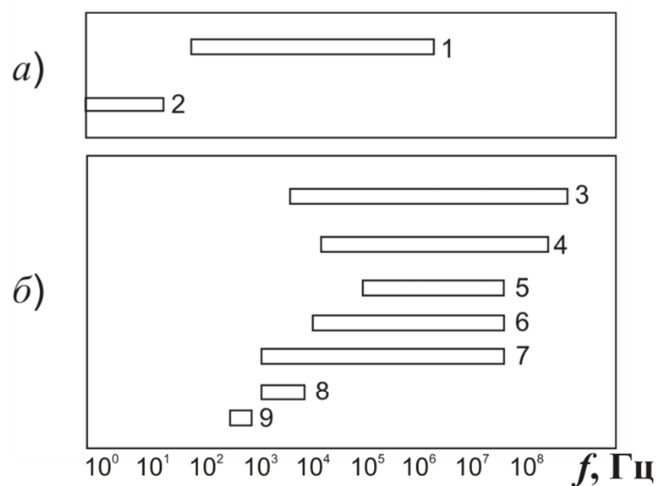


Рис. 15.1. Частотні спектри електромагнітних імпульсних (а) і періодичних (б) процесів, що викликають перешкоди в електротехнічних установках і пристроях:

- 1 – комутаційні процеси; 2 – кидки навантаження; 3 – радіо і телевізійні приймачі; 4 – комп'ютерні системи; 5 – мережеві комутаційні пристрої; 6 – електротехнічні установки; 7 – електроприймачі; 8 – централізоване управління; 9 – мережа електроживлення

Головними причинами таких дій є:

- комутаційні процеси на стороні високої напруги, що виникають в результаті планових перемикань, аварійних процесів (короткі замикання, перекриття ізоляції ліній електропередачі, перемикавання, у тому числі операції з роз'єднувачами);
- комутаційні процеси на стороні низької напруги при включеннях і відключеннях апаратури, що містить індуктивні ланцюги, надточні пристрої, що створюють сильні електричні й магнітні поля промислової частоти;
- наявність потужних високочастотних пристроїв зв'язку, передачі даних і т.п., а також наявність коливань напруги з частотою вищих гармонік, перерв живлення в ланцюгах електропостачання оперативного струму й т.д.;

- розряди статичної електрики, удари блискавки безпосередньо в об'єкти, що підходять до ліній або розташовані поблизу них.

Комутаційні процеси на стороні високої напруги в результаті планових перемикань, аварійних процесів (короткі замикання, перекриття ізоляції ліній електропередачі, перемикання й т.п.) і низької напруги створюють перехідні електромагнітні перешкоди, перш за все, в технічних засобах автоматизації, управління, захисту.

При цьому в мережі високої напруги можуть виникати затухаючі коливання з частотою в сотні кілогерц і перенапруження, що у багато разів перевищують номінальну напругу. До найбільш інтенсивних перешкод, небезпечних для дискретних засобів автоматики в *пристроях низької напруги*, відносяться електромагнітні перешкоди, що створюються при комутації індуктивних ланцюгів. У несприятливих випадках при комутації індуктивних ланцюгів можливі значні рівні електромагнітних перешкод: перенапруження в місцях їх виникнення в електричних мережах напругою до 10 кВ; при крутизні перенапружень до 100 В/нс; час наростання імпульсу перенапруження – від 1 нс до 1 мс; перешкоди в лініях передачі даних, обумовлених перенапруженнями в електричних мережах.

За певних умов, як правило при перевищенні нормованих рівнів, електромагнітні перешкоди можуть привести до порушення *перешкодостійкості* технічних засобів електростанцій і підстанцій, зокрема, широко впроваджуваних нині пристроїв мікропроцесорних засобів захисту.

Проведені дослідження приблизно на 100 діючих підстанціях показали: до 15 % випадків ушкодження або неправильного функціонування вторинного устаткування обумовлено невиконанням умов електромагнітної сумісності.

У табл. 15.1 вказано види і характеристики деяких електромагнітних перешкод, що впливають на технічні засоби електростанцій і підстанцій.

У системах електропостачання підприємств в нормальному симетричному режимі експлуатації існують фонові перешкоди, рівні яких знаходяться в межах допустимих стандартних значень. Як правило, відхилення діючого значення від номінального коливається в межах $\pm 2\%$; в тих же межах знаходиться і несиметрія трифазних напруг по зворотній послідовності. Фонові рівні несинусоїдальності, обумовлені перш за все несиметрією магнітопроводів трансформаторів, зазвичай не перевершують 2 - 3%.

На практиці спостерігаються неперіодичні провали напруги, пов'язані з комутацією двигунів, трансформаторів, конденсаторів і т. п. Як правило, глибина провалів не перевищує декількох відсотків номінальної напруги при тривалості від 100 мс до декількох секунд. Провали напруги, що виникають при короткому замиканні, внаслідок ушкодження ізоляції обумовлюють зниження напруги до 10 % номінального значення при тривалості від 500 мс до декількох секунд. Спостерігаються також періодичні зниження напруги, що визначаються роботою керованих вентилях перетворювачів, а також періодичні та неперіодичні перенапруження тривалістю до декількох десятків мікросекунд. Однією з причин таких перенапружень є грозові розряди.

Деякі види і характеристики електромагнітних перешкод, що впливають на технічні засоби електростанцій і підстанцій

Тривалі перешкоди	Перешкоди перехідного характеру з високою вірогідністю виникнення	Перешкоди перехідного характеру з низькою вірогідністю виникнення
Повільні зміни напруги : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму	Провали напруги електроживлення (тривалість не більше 0,02 с) : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму	Провали напруги електроживлення (тривалість більше 0,02 с) : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму
Гармонійні складові та інтергармоніки напруги електроживлення	Коливання напруги електроживлення	Переривання напруги електроживлення: - у системах електропостачання змінного струму
Напруга промислової частоти	Затухаюче коливальне магнітне поле	Мікросекундні імпульсні перешкоди великої енергії
Кондуктивні перешкоди в смузі частот від 0 до 150 кГц (виключаючи перешкоди на частоті 50 Гц)	Електростатичні розряди	Короткочасна напруга промислової частоти

Основні джерела штучних електромагнітних перешкод у СЕП підприємств

На сучасних промислових підприємствах більше половини електроенергії використовується в перетвореному вигляді (на металургійних заводах – більше 90 %). Широко вживані вентильні перетворювачі, різного роду перетворювачі частоти, побутові прилади, працюючі як у статичних, так і в перехідних режимах, є потужними генераторами електромагнітних перешкод.

Нелінійні навантаження – дугові сталеплавильні печі й установки електрозварювань, вітроелектростанції, силові трансформатори, двигуни – також генерують значні перешкоди.

Розглянемо джерела штучних електромагнітних перешкод в системах електропостачання підприємств.

Робота електроустановок усіх виробництв створює відхилення напруги. Коливання напруги мають місце при роботі електроустановок машинобудівних підприємств (з потужними зварювальними агрегатами), підприємств чорної металургії з дуговими сталеплавильними печами і кольорової металургії з електролізними установками.

Несиметрія напруги виникає при роботі потужних однофазних електроприймачів, тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту, підприємств з потужними зварювальними установками. Тут

спостерігається нерівномірний розподіл однофазних споживачів і неодночасна зміна навантаження по фазах. Несинусоїдальність напруги викликається роботою дугових сталеплавильних печей, електролізних установок, тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту.

Вентильні перетворювачі є потужними концентрованими джерелами гармонійних перешкод – вищих гармонік. У найчастіше вживаних 6-пульсних мостових схемах переважаючими є 5, 7, 11 і 13-а гармоніки, звані *канонічними*, рівні яких (по відношенню до 1-ої гармоніки) зворотно пропорційні номеру, тобто $1/5$, $1/7$, $1/11$, $1/13$. При використанні 12-пульсних схем теоретично відсутні 5-а і 7-а гармоніки, а переважають 11-а і 13-а. Такі перетворювачі застосовуються, наприклад, в схемах головних приводів прокатних станів, електролізному виробництві й т.ін.

При *ударних навантаженнях*, наприклад у прокатному виробництві, в живлячих електричних мережах відбуваються провали і коливання напруги.

При роботі прокатних станів у разі відсутності спеціальних швидкодіючих компенсуючих пристроїв виникають значні коливання напруги. Так, в мережі напругою 10 кВ стана типу «слябінг» доза флікера (одиниця виміру коливань напруги) складає 10,5; на шинах напругою 10 кВ – 2,2. У мережі стана типу «блюмінг» значення дози флікера становить більше 4.

Наприклад, накиди реактивної потужності при захопленні металу валками на стані холодного прокату сягають 2000 Мвар, що призводить до виникнення провалів напруги (залежно від номінальної напруги і потужності короткого замикання) до 10...12 %.

Вентильний перетворювач, працюючий в мережі з несиметрією лінійної напруги, є джерелом струму зворотної послідовності:

$$I_2 = 0,5K_{2U}I_1, \quad (15.1)$$

де K_{2U} – коефіцієнт несиметрії лінійної напруги при зворотній послідовності; I_1 – 1-а гармоніка мережевого струму вентильного перетворювача в симетричному режимі.

Фаза струму I_2 :

$$\arg I_2 = \varphi_2 + \alpha \quad (15.2)$$

де φ_2 – зрушення по фазі між векторами струмів I_2 і I_1 ; α – кут управління вентильним перетворювачем.

Перетворювачі частоти (ПЧ) останніми роками знаходять більш широке застосування для регулювання швидкості обертання двигунів у складі системи управління частотно-регульованого електроприводу в металургії, машинобудуванні, на підприємствах легкої промисловості. Перетворювачі частоти є джерелами *гармонійних електромагнітних перешкод* не лише вищих гармонік, але й так званих інтергармонік (ІГ) або міжгармонік, частоти яких знаходяться між частотами канонічних вищих гармонік. Джерелами інтергармонік є також споживачі, постійно або короткочасно працюючі в перехідному режимі: *дугові сталеплавильні печі, установки електрозварювання, вентильні перетворювачі прокатних станів й інші різкозмінні нелінійні навантаження.*

На рис. 15.2 представлено структурну схему перетворювача частоти з ланкою постійного струму, що складається з випрямляча B , інвертора I (як правило, інвертора напруги) та індуктивно-ємнісного фільтру (ланка постійного струму):

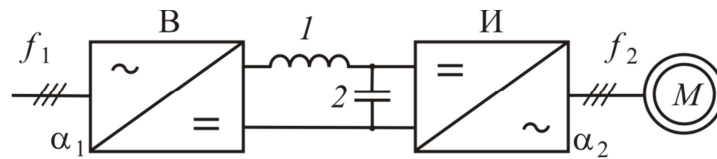


Рис. 15.2. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму (реактором і конденсатором) :

f_1 f_2 – відповідно вхідна частота від випрямляча B і вихідна частота інвертора I ; α_1 , α_2 – кути управління випрямлячем й інвертором; I – реактор; 2 – конденсатор; M – двигун змінного струму (мотор)

Випрямляч й інвертор можуть бути керованими або некерованими. Потужні перетворювачі частоти у складі фільтру мають згладжуючий реактор, призначений для зменшення пульсацій випрямленого струму. В малопотужних перетворювачах частоти у ланці постійного струму міститься тільки конденсатор.

У всіх випадках перетворювачі частоти підключаються до мережі безпосередньо (без спеціального трансформатора).

Кожній канонічній вищій гармоніці в мережевому струмі відповідають дві інтергармоніки (4, 6, 8, ...). Спектральний склад вхідного (мережевого) струму $f_{вх}$ має вигляд:

$$f_{вх} = (kp_1 \pm 1) f_1 + p_2 f_2 v. \quad (15.3)$$

Як приклад приведемо спектр частот навколо канонічної 7-ої гармоніки (рис. 15.3).

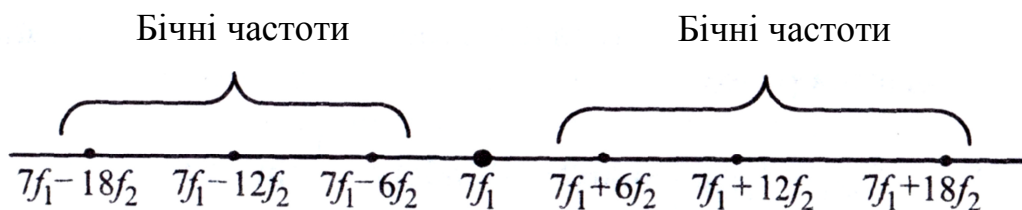


Рис. 15.3. Частотний спектр бічних частот навколо 7-ої вищої гармонійної складової

Як правило, $f_1 \neq f_2$. Навколо кожної канонічної гармоніки (рис. 15.3) з'являється ряд бічних частот – інтергармонік. Значення $(7f_1 - 18f_2) \geq 5f_1$ і $(7f_1 + 18f_2) < 11f_1$.

На рис. 15.3 представлено частотний спектр вищих гармонік та інтергармонік для перетворювача частоти (рис. 15.2) при $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = 30$ Гц. З рис. 15.4 видно, що амплітуда інтергармоніки 2-го і 4-го порядку сягають 22 % номінального струму 1-ої гармоніки, рівень 5-ої гармоніки – 40 %.

Безпосередні перетворювачі частоти, звані *циклоконверторами*, складаються з двох зустрічно включених випрямлячів (рис. 15.5). Залежно від виду модулюючої функції, що формується системою імпульсно-фазового управління (СІФУ), рівень інтергармонік у мережевому струмі перевищує рівні канонічних вищих гармонійних.

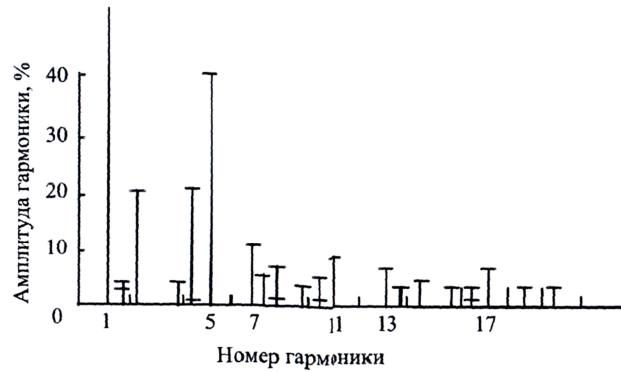


Рис. 15.4. Розрахунковий спектр вищих гармонійних складових струму перетворювача частоти з ланкою постійного струму

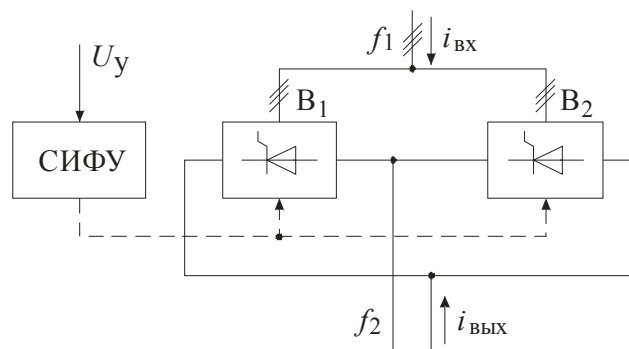


Рис. 15.5. Структурна схема безпосереднього перетворювача частоти з однофазним виходом: B_1, B_2 – зустрічно включені випрямлячі; f_1, f_2 – відповідно вхідна і вихідна частоти струму

Дугова сталеплавильна піч (струм дуги – 25...70 кА) є джерелом значних електромагнітних перешкод: *несинусоїдальності, коливань і несиметрії* напруги. Найбільшою мірою генерування перешкод проявляється в період розпрямлення металу. Усереднені значення спектру вищих гармонік струму, генерованих дуговою сталеплавильною піччю, складають:

Номер гармоніки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значення гармоніки струму, %	100	2,7	2,3	0,65	2,3	1,3	1,5	1,0	0,85

Спектр процесу змін струму дугової сталеплавильної печі в період розплавлення металу є змішаним і складається з дискретної і безперервної складових.

Енергія інтергармонік для сталеплавильних печей продуктивністю 100 т і 200 т сягає 20 % всієї енергії змішаного спектру.

Несиметрія напруги на шинах печей залежно від напруги живлення дорівнює 5...6 % для мереж напругою 6...35 кВ і 3 % для мереж напругою 110 кВ. Для цих же випадків значення дози флікера (мигань) знаходиться, як правило, у межах 1,5...10.

Установки електрозварювань створюють практично всі основні електромагнітні перешкоди, що характеризують якість електроенергії: несинусоїдальність, несиметрію, провали і коливання напруги.

Струми n -ої вищої гармоніки I_n машин контактного зварювання визначаються за виразом:

$$I_n = \frac{S_{\text{ном}} k_{3.c} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{ф.с}}}}{n^2 U_{\text{ном}}}, \quad (15.4)$$

де $S_{\text{ном}}$ – номінальна (паспортна) потужність установки електрозварювання; $k_{3.c}$, $\text{ПВ}_{\text{ф.с}}$ – середньостатистичні коефіцієнти відповідно завантаження і фактичної тривалості включення; $n = 3, 5, 7$ – номер вищої гармоніки; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі.

Межі зміни значень гармонік струму односточкових установок для $n = 3$ складають 12...30 %, для $n = 5-4$...15 %, для $n = 7 - 2$...8 %.

Струми вищих гармонік зварювальних машин постійного струму і зварювальних випрямлячів, комутованих за 6-пульсною схемою, розраховуються за аналогічним виразом:

$$I_n = \frac{S_{\text{ном}} k_{3.c} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{ф.с}}}}{\sqrt{3} n^2 U_{\text{ном}}}, \quad (15.5)$$

де $n = 5, 7, 11$.

Коефіцієнт несиметрії в мережах з установками електрозварювань знаходиться в межах 1...5 %.

Установки електрозварювань є також джерелами інтергармонік. При точковому зварюванні інтергармоніки з'являються в діапазоні 35...75 Гц з амплітудами, що сягають 20 % основної гармоніки зварювального струму. Для усіх установок електрозварювань енергія дискретного спектру складає 6...20 % загальної енергії змішаного спектру. Параметри провалів напруги приведено в табл. 15.2.

Таблиця 15.2

Параметри провалів напруги, що створюються установками електрозварювань деяких типів

Тип машини	Потужність установки, кВ·А	Глибина провалу напруги, %	Тривалість провалу напруг, с
Точкова стаціонарна	75	1,2	0,18
Стикувальна	750	13,0	0,70
Багатоточкова	63	16,3	0,36
Дугова	60	1,0	27,00

Газорозрядні лампи (люмінесцентні й дугові ртутні) є джерелами вищих гармонік порядку $n = 3, 5, 7$. Генерування несинусоїдальності обумовлене нелінійністю вольтамперної характеристики дуги і наявністю дроселя в комплекті пускорегулюючої апаратури. Відносне значення струмів 3-ої і 5-ої гармонік складає відповідно до 16...21 і 0,9...3 % – для люмінесцентних ламп з індуктивно-ємнісним баластним опором і 18 і 5,8...7,2 % – для дугових ртутних ламп з компенсацією. При цьому значення гармонік струму знаходяться за виразом:

$$I_n = \frac{0,2S_{\text{НОМ}}}{n^2 U_{\text{НОМ}}}, \quad (15.6)$$

де $S_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність дугових ртутних ламп.

Вітроенергетичні установки є інтенсивними джерелами електромагнітних перешкод, в основному, вищих гармонік і коливань напруги. На Рис. 15.6 представлено типову схему вітроустановки. Інвертор сполучений з електричною мережею напругою 10 кВ безпосередньо або через підвищуючий трансформатор. На секціях шин на напругу 10 кВ робилися виміри тривалої дози флікера P_L і коефіцієнта спотворення синусоїдальності K_U .

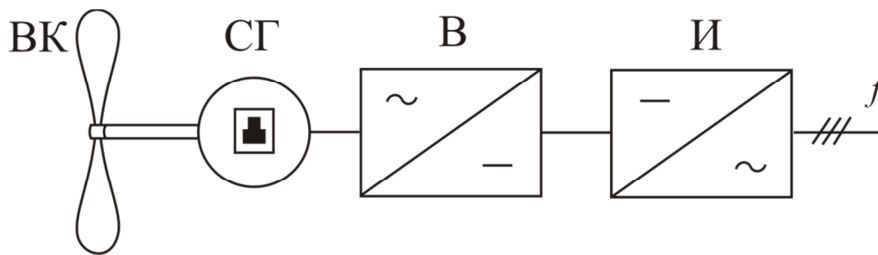


Рис. 15.6. Схема вітроенергетичної установки:

СГ – синхронний генератор; В – випрямляч; И – інвертор; ВК - вітроколесо

Представлені вище з позиції ЕМС електроустаткування й електричні пристрої відносяться до нелінійних навантажень. У сучасних СЕП спостерігається все зростаюча питома вага перетворювачів навантаження, заснована на пристроях силової перетворювальної техніки та енергоелектроніки. У схемах цих пристроїв використовуються, як правило, випрямлячі і (чи) інвертори, що комутують за 6- або 12-пульсною мостовою схемою.

Максимальний рівень електромагнітних перешкод у розподільній мережі підприємства напругою 0,38...35 кВ

Причина електромагнітних перешкод	Рівень перешкод, H_n	Тривалість імпульсу, мкс
Відключення або включення ліній:		
вимикачем	+1,7	5...20
вимикачем при короткому замиканні	–	5...20
роз'єднувачем	+2,5	500...1500
Удар блискавки	+2,5	до 1000
Корона на живлячих лініях напруги 110 кВ і вище	–5,0	постійна

Розрахунки електромагнітних перехідних процесів з урахуванням вимог ЕМС

На електричних станціях і підстанціях промислових підприємств переважаючими видами ЕМП є гармонійні перешкоди – *вищі гармоніки* струму і напруги, обумовлені, перш за все, широким застосуванням силової перетворювальної техніки. Постійна наявність вищих гармонік призводить до електромагнітних втрат і додаткового нагріву електроустаткування. При рівнях вищих гармонік, що перевищують фонові значення, спостерігається нагрів електроустаткування і, як наслідок, виникає процес зниження електричної міцності ізоляції, інтенсивніше зростає знос ізоляції, виникає вірогідність ушкодження (пробою). Очевидно, що в цьому випадку надійність і термін служби ізоляції й електроустаткування знижуються.

Відомо, наприклад, що для кабелів термін служби ізоляції I_x (відносне значення) класу А зменшується у 2 рази при збільшенні температури нагріву на кожні 6° , тобто:

$$I_x = 2^{\frac{\tau - \tau_{\text{доп}}}{6}}, \quad (15.7)$$

де τ – температура нагріву ізоляції, $^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{доп}}$ – допустима температура нагріву жили кабелю, що складає 65°C для кабелів 6 кВ і 60°C для кабелів 10 кВ.

Оцінка міри термічної дії струму КЗ робиться за допомогою інтеграла Джоуля B_k (теплого імпульсу):

$$B_k = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_k dt, \quad (15.8)$$

де i_k – струм КЗ у момент часу t , А; $t_{\text{откл}}$ – розрахункова тривалість КЗ, с.

Можлива оцінка за допомогою термічно еквівалентного струму КЗ $I_{\text{тер.ел.}}$:

$$I_{\text{тер.эл}} = \sqrt{\frac{B_{\text{к}}}{t_{\text{откл}}}}. \quad (15.9)$$

У розрахунках інтеграл Джоуля допустимо визначати за формулою:

$$B_{\text{к}} = B_{\text{кп}} + B_{\text{ка}}, \quad (15.10)$$

де $B_{\text{кп}}$ і $B_{\text{ка}}$ – інтеграл Джоуля відповідно до періодичної й аперіодичної складових струму КЗ.

Для випадку довільної розрахункової схеми при віддалених КЗ і (чи) синхронних компенсуючих інтеграл Джоуля і термічно еквівалентне джерело КЗ визначаються за наближеними формулами:

:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п.с.}}^2 (t_{\text{откл}} + T_{\text{азк}}),$$

$$T_{\text{терэк}} = I_{\text{п.с.}} \sqrt{1 + \frac{T_{\text{азк}}}{t_{\text{откл}}}}, \quad (15.11)$$

де $I_{\text{п.с.}}$ – діюче значення періодичної складової еквівалентного джерела енергії (системи), А; $T_{\text{азк}}$ – еквівалентна постійна часу загасання аперіодичної складової струму КЗ, с.

Електричні апарати і кабелі задовольняють умовам термічної стійкості, якщо:

$$B_{\text{к}} \leq B_{\text{тер сп}}, \quad I_{\text{тер.эл}} \leq I_{\text{тер.доп}}. \quad (15.12)$$

Для кабелів 6-10 кВ з паперовою ізоляцією гранично допустима температура нагріву при КЗ складає $\Theta_{\text{доп}} = 200^\circ\text{C}$.

Додаткові втрати за рахунок електромагнітних перешкод призводять до додаткового нагріву електроустаткування $\Delta\tau$ і скорочення терміну служби ізоляції (електроустаткування в цілому) на $\Delta T_{\text{сл}} = T_{\text{с}} - T_{\text{с}}^{(\text{нз})}$, де $T_{\text{с}}$ і $T_{\text{с}}^{(\text{нз})}$ – термін служби елементів СЕП за наявності й відсутності ЕМП. Тривалість дієздатності ізоляції оцінюється за формулою Монтзингера:

$$T_{\text{с}} = A e^{-0,086\tau}, \quad (15.13)$$

де A - коефіцієнт, залежний від виду ізоляції; 0,086 – параметр Монтзингера, заснований на припущенні, що перегрівання на 8° призводить до скорочення терміну служби ізоляції удвічі; τ - температура нагріву ізоляції.

Відносне скорочення терміну служби ізоляції електроустаткування:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{с}} - T_{\text{с}}^{(\text{нз})}}{T_{\text{с}}} = 1 - e^{-0,086\Delta\tau} \approx 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2}. \quad (15.14)$$

Скорочення терміну служби ізоляції призводить до відповідного зниження надійності функціонування електроустаткування, зростання вірогідності її ушкодження й виникнення міжфазного або трифазного КЗ.

Оцінку надійності після часу нормальної експлуатації $t_{н.э}$ роблять, як правило, за допомогою закону (рівняння) Вейбулла. Функція надійності $R(t)$ по Вейбуллу:

$$R(t) \approx 1 - \lambda t^\alpha, \quad (15.15)$$

де α - параметр форми розподілу; λ - параметр потоку відмов.

На практиці для розрахунку різного виду електроустаткування використовуються табличні значення цих параметрів.

Значення функції надійності $R(t)$ для часу t , узятє з урахуванням скорочення терміну служби ізоляції, відповідає рівню надійності, вірогідності ушкодження ізоляції й виникнення КЗ.

ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

1. Комутації, що відбуваються в електричних системах, супроводжуються зміною запасів електричної енергії, зосередженої в *індуктивних та ємнісних* елементах електроустаткування. Ці зміни супроводжуються виникненням перехідних процесів, які представляються у вигляді змін у часі струмів, напруги й інших параметрів, що характеризують фізичні процеси.

2. Проблема аналізу і розрахунку перехідних процесів у СЕП є часткою загальної проблеми електромагнітної сумісності, сформульованої й оформленої науковою дисципліною «Електромагнітна сумісність».

3. Окремі види електроустаткування є або генераторами перешкод (джерелами *емісії перешкод*) або об'єктами їх впливу, що характеризує їхню електромагнітну сумісність.

4. Тривала дія електромагнітних перешкод (ЕМП) на ізоляцію електроустаткування може привести до її ушкодження і, як наслідок, до виникнення КЗ.

5. Проникнення електромагнітних перешкод до ланцюга систем автоматики, зв'язку і систем захисту викликає збої в роботі цих систем (*порушення електромагнітної сумісності*).

6. Виявлення електромагнітних перехідних процесів у СЕП підприємств повинне включати не лише розрахунки струмів КЗ і стійкості паралельної роботи електростанцій електричних мереж, але й комплекс питань електромагнітної сумісності.

7. СЕП підприємства є джерелом великої кількості електромагнітних перешкод.

8. Електротехнічні пристрої є не лише генераторами електромагнітних перешкод, а й об'єктом дії інших перешкод як в аварійних, так і нормальних режимах.

9. Комутаційні процеси на стороні високої напруги в результаті планових перемикань, аварійних процесів і низької напруги створюють перехідні електромагнітні перешкоди.

10. До найбільш інтенсивних перешкод, небезпечних для дискретних засобів автоматики в пристроях низької напруги, відносяться електромагнітні перешкоди, що створюються при *комутації індуктивних ланцюгів*.

11. На практиці спостерігаються неперіодичні провали напруги, пов'язані з комутацією двигунів, трансформаторів, конденсаторів.

12. Провали напруги, що виникають при короткому замиканні, внаслідок ушкодження ізоляції обумовлюють зниження напруги до 10 % номінального значення при тривалості від 500 мс до декількох секунд.

13. Спостерігаються періодичні зниження напруги, що визначаються роботою керованих вентиляльних перетворювачів, а також періодичні та неперіодичні перенапруження тривалістю до декількох десятків мікросекунд.

14. Нелінійні навантаження – дугові сталеплавильні печі й установки електрозварювань, вітроелектростанції, силові трансформатори, двигуни – також генерують значні перешкоди.

15. Несинусоїдальність напруги викликається роботою дугових сталеплавильних печей, електролізних установок, тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту.

16. Вентильні перетворювачі є потужними концентрованими джерелами гармонійних перешкод – вищих гармонік.

17. При ударних навантаженнях, наприклад у прокатному виробництві, в живлячих електричних мережах відбуваються провали і коливання напруги.

18. *Перетворювачі частоти* є джерелами гармонійних електромагнітних перешкод не лише вищих гармонік, але й так званих інтергармонік (ІГ) або міжгармонік, частоти яких знаходяться між частотами канонічних вищих гармонік.

19. Джерелами інтергармонік є також споживачі, постійно або короткочасно працюючі в перехідному режимі: дугові сталеплавильні печі, установки електрозварювання, вентильні перетворювачі прокатних станів й інші різкозмінні нелінійні навантаження.

20. *Дугова сталеплавильна піч* є джерелом значних електромагнітних перешкод: несинусоїдальності, коливань і несиметрії напруги.

21. *Установки електрозварювань* створюють практично всі основні електромагнітні перешкоди, що характеризують якість електроенергії: несинусоїдальність, несиметрію, провали і коливання напруги.

22. *Газорозрядні лампи* (люмінесцентні й дугові ртутні) є джерелами вищих гармонік порядку $n = 3, 5, 7$.

23. *Вітроенергетичні установки* є інтенсивними джерелами електромагнітних перешкод, в основному, вищих гармонік і коливань напруги.

24. У сучасних СЕП спостерігається все зростаюча питома вага перетворювачів навантаження, заснована на пристроях силової перетворювальної техніки та енергоелектроніки.

25. На електричних станціях і підстанціях промислових підприємств переважаючими видами ЕМП є гармонійні перешкоди – вищі гармоніки струму і напруги, обумовлені широким застосуванням силової перетворювальної техніки.

26. Постійна наявність вищих гармонік призводить до електромагнітних втрат і додаткового нагріву електроустаткування. Для кабелів термін служби ізоляції класу А зменшується у 2 рази при збільшенні температури нагріву на кожні 6° .

Тестові питання по темі 15

1. Які існують електромагнітні перешкоди в СЕП підприємств? Як їх змінити?
2. За рахунок яких джерел (пристроїв) існує генерація електромагнітних перешкод?
3. Як оцінюються електромагнітні перешкоди в СЕП підприємств?
4. Як визначають частотні спектри електромагнітних перешкод?
5. Які види і характеристики електромагнітних перешкод на електростанціях та підстанціях?
6. Як оцінити штучні електромагнітні перешкоди в СЕП підприємств?
7. Чому виникають інтергармоніки в сучасних системах електропостачання?
8. Як оцінити спектральний склад мережевого струму?
9. Чому виникають провали напруги в СЕП підприємств?
10. Основні принципи розрахунків перехідних процесів з урахуванням вимог ЕМС? Як оцінити параметри цих режимів?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. *Андерсон П., Фуад А.* Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
2. *Бернас С., Цяк З.* Математические модели элементов электроэнергетических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – 313 с.
3. *Буслова Н. В.* и др. Электрические системы и сети. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 584 с.
4. *Важнов А. И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
5. *Веников В. А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
6. *Гамазин С.И., Садыкбеев Т.А.* Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой.-Алма-Ата: "Гылым", 1991. – 301 с.
7. *Гамазин С.И., Семический П.И.* Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения с электродвигательной нагрузкой. – М.: МЭИ, 1985. – 91 с.
8. *Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А.* Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
9. *Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатарян Э.А.* Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
10. *Жданов П. С.* Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
11. *Маркович И. М.* Режимы энергетических систем. – М.:Госэнергоиздат, 1969. – 350 с.
12. *Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В.А. Веников, В.И. Идельчик, М.С. Лысеев.* – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 316 с.
13. *Рюденберг Р.* Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. – Л.: Энергия, 1981. – 578 с.
14. *Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В.И. Круповича и др.* – М.: Энергия, 1980. – 456 с.
15. *Сыромятников И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л. Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
16. *Электроненергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова.* – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 456 с.
17. *Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education from Ukrainian by S.I. Kostriiska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov.* – 2 nd edition. – D.: National Mining University. – 2013. – 239 p.

Півняк Геннадій Григорович
Папайка Юрій Анатолійович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Перехідні процеси в системах електропостачання»

Частина I: «Електромагнітні перехідні процеси»

для студентів спеціальності

141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Видано в редакційній обробці авторів

Підписано до друку 27.08.2021. Формат 30 x 42/4.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 9,5.

Обл.-вид. арк. 12,3. Тираж 50 пр. Зам. №

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.