

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ,
АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ІМ.ПРОФ. В.М. СИНЬКОВА

**Методичні вказівки до виконання курсової роботи
з дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці»**

для підготовки фахівців РВО "Перший (бакалаврський)" Галузь знань 14 –
Електрична інженерія Спеціальність 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка Спеціалізація Електротехніка та
електротехнології

Київ-2021

УДК 621.311

Наведено завдання та методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці» для підготовки фахівців РВО "Перший (бакалаврський)" Галузь знань 14 – Електрична інженерія Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка Спеціалізація Електротехніка та електротехнології

Рекомендовано вченою радою ННІ енергетики і автоматики НУБіП України №11 від 17.12.2021.

Укладач: О.В. Гай

Рецензенти:

Березюк А.О., к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій НУБіП України

Петренко А.В., к.т.н., доцент, доцент кафедри електропостачання ім. В.М. Синькова НУБіП України

Навчальне видання Методичні вказівки до виконання до виконання курсової роботи з дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці» для підготовки фахівців РВО "Перший (бакалаврський)" Галузь знань 14 – Електрична інженерія Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка Спеціалізація Електротехніка та електротехнології

Укладач: Гай Олександр Валентинович

ВСТУП

Основні положення енергетичної програми України на тривалу перспективу передбачають проведення активної енергозберігаючої політики на базі прискореного науково-технічного прогресу у всіх ланках господарства, всіляку економію палива й енергії, удосконалювання енергетичного устаткування, скорочення всіх видів енергетичних втрат і поліпшення структури виробництва, перетворення й використання енергетичних ресурсів.

Реалізація енергетичної програми України забезпечує прискорені темпи електрифікації народного господарства. Питома електроємність національного доходу повинна підвищитися на 5–6% у першому десятилітті й до 15% – за 20 років. Одночасно передбачається подальший ріст енергоспоживання на душу населення.

В області електроенергетики в найближчі два десятиліття напечене завершення формування Єдиної енергетичної системи (ЕЕС) з підвищенням її маневреності й надійності завдяки будівництву пікових електростанцій, ліній електропередач надвисокої напруги змінного і постійного струму, поліпшенню якості електроенергії, що відпускається споживачам. Передбачається нарощування генеруючих потужностей ЕЕС шляхом будівництва великих атомних електростанцій, потужних конденсаційних теплових електростанцій на органічному паливі.

Велике значення питань, що виникають при розгляді перехідних процесів як під час нормальної експлуатації електроустановок (включення й відключення навантажень, джерел живлення, окремих ланцюгів й ін.), так і при можливих виникненнях аварійних режимів (короткі замикання, обриви фаз, випадання машин із синхронізму й ін.), дозволило об'єднати їх і винести для вивчення в окрему дисципліну "Перехідні процеси в системах електропостачання". Її мета – навчити студентів вирішувати практичні

завдання проектування систем електропостачання (СЕС) з урахуванням перехідних процесів. До них ставляться такі завдання, як вибір електричних апаратів, обґрунтування економічних схем електричних з'єднань систем електропостачання та її окремих елементів, проектування й настроювання захистів від коротких замикань тощо. Вивчення перехідних процесів необхідно також для вміння запобігти виникненню режимів, небезпечних для систем електропостачання та їхніх окремих елементів.

У перехідних режимах системи електропостачання змінюється електромагнітний стан її елементів і порушується баланс між електромагнітним моментом і моментами на валах обертових машин. При цьому зменшується або збільшується частота обертання машин. Такий режим триває протягом часу, необхідного для відновлення нормального стану системи в умовах, що змінилися.

Таким чином, перехідний процес характеризується сукупністю електромагнітних і механічних змін у системі, взаємно зв'язаних між собою. Однак через порівняно велику механічну інерцію обертових машин початкова стадія перехідного процесу характеризується переважно електромагнітними змінами. Це дозволяє за певних умов розглядати явища електромагнітного характеру або окремо від механічних змін, або разом з ними. Відповідно до цього дисципліна "Перехідні процеси в системах електропостачання" складається із двох частин. У першій з них розглядаються електромагнітні процеси, обумовлені короткими замиканнями, розривами провідників й інших раптових порушень симетрії в трифазних ланцюгах. У другій частині вивчаються спільно електромагнітні й механічні процеси, пов'язані зі стійкістю синхронних машин, паралельною роботою окремих елементів системи, стійкістю навантаження.

Оскільки у процесі експлуатації систем електропостачання виникнення аварійних режимів може призводити до значного збитку, обумовленого припиненням електропостачання багатьох споживачів, заходи щодо скорочення й виключення аварійних ситуацій і зв'язаних з ними перехідними процесами мають важливе народногосподарське значення.

У процесі вивчення матеріалу курсу навчальним планом передбачаються лекційні, практичні й лабораторні заняття, а також виконання курсової роботи.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1.1. Загальні відомості про перехідні процеси

Програмою курсу в даній темі передбачене ознайомлення з короткими історичними відомостями про виникнення й розвиток проблеми перехідних процесів у системах електропостачання (СЕС). В рамках цього питання необхідно звернути увагу на причини створення й постійного вдосконалювання провідних вказівок за розрахунками струмів короткого замикання (КЗ) і визначенням стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС), напрямком розвитку різних способів і засобів аналізу й розрахунку перехідних процесів (розрахункові моделі постійний і змінний токи, аналогові машини, цифрові обчислювальні машини, гібридні пристрої з комплексним використанням елементів аналогової й цифрової обчислювальної техніки).

При вивченні перехідних процесів важливо одержати чітке поняття про можливі режими СЕС (нормальні сталі, нормальні перехідні, аварійні сталі й перехідні, післяаварійні сталі режими).

Варто ознайомитися із причинами виникнення перехідних процесів, обумовленими як змінами режимів у процесі експлуатації СЕС, так й ушкодженнями ізоляції й струмоведучих частин електроустановок.

При вивченні загальних відомостей важливе місце приділяється питанням призначення розрахунків перехідних процесів, що включають у себе практичне рішення завдань проектування, спорудження й експлуатації СЕС. При цьому потрібно акцентувати увагу на обґрунтуванні економічно

доцільних СЕС із обліком можливих перехідних режимів, змін якісних показників електропостачання споживачів і надійності СЕС.

При цьому потрібно акцентувати увагу на обґрунтуванні економічно доцільних СЕС із обліком можливих перехідних режимів, змін якісних показників електропостачання споживачів і надійності СЕС.

Необхідно звернути особливу увагу на вихідні положення, фізичні пояснення процесів, що відбуваються, і порядок вирішення поставлених завдань. Для успішного виконання практичних розрахунків варто запам'ятати прийоми розрахунків, числові значення найбільш характерних параметрів, використовувані формули й область їхнього застосування, ([I] с. 6–11, 21–25).

Запитання для самоперевірки

1. Види перехідних процесів.
2. Можливі режими СЕС й їхнє визначення.
3. Причини виникнення перехідних процесів.
4. Яке розходження між стійкими й нестійкими ушкодженнями ізоляції й струмоведучих частин?
5. Призначення розрахунків перехідних процесів.
6. Вплив перехідних процесів на надійність СЕС.

1.2. Короткі замикання в системах електропостачання

У цій темі розглядаються перехідні процеси при найпоширеніших видах ушкоджень – коротких замиканнях в електричних установках СЕС.

У процесі вивчення даної теми необхідно ознайомитися з видами КЗ, причинами їхнього виникнення й можливими наслідками. Варто знати, для яких цілей потрібно розраховувати струми КЗ й які приймаються допущення при визначенні струмів КЗ.

Необхідно придбати навички у складанні розрахункової схеми коротко замкнутого ланцюга, заміні її еквівалентною схемою заміщення й визначенні результуючого опору між джерелами електроенергії й крапкою КЗ. При цьому потрібно навчитися приводити параметри коротко замкнутого ланцюга до базисних умов в іменованих і відносних одиницях. Розглянути способи точного й наближеного приведення розрахункових параметрів ланцюга КЗ до базисних умов і визначення її результуючого опору, ([I], с. 25–45).

Запитання для самоперевірки

1. Як впливають прийняті спрощення й допущення в СЕС на точність визначення струмів КЗ?
2. Призначення розрахунків струмів КЗ.
3. Які види КЗ належать до симетричних, а які – до несиметричних?
4. Причини виникнення КЗ.
5. Які наслідки можуть виникати при КЗ?
6. Яка схема називається розрахунковою схемою КЗ?
7. Які елементи СЕС включають у розрахункову схему КЗ?
8. Як складається еквівалентна схема заміщення ланцюга КЗ?
9. Як визначається результуючий опір ланцюга КЗ?
([I], с. 25 – 49).

1.3. Перехідні процеси в обертових машинах при трифазних коротких замиканнях

Вивчення цієї теми має важливе значення для розгляду впливу КЗ у різних точках СЕС на джерела електроенергії й для розуміння процесу його протікання з погляду законів фізики. Для визначення параметрів синхронної машини в перехідному режимі користуються диференціальними рівняннями рівноваги ерс і падіння напруг у кожній з її обмоток. При розгляді цих рівнянь повинна бути звернена особлива увага на спосіб їхнього спрощення

за допомогою узагальненого вектора трифазної системи й одержання рівнянь Парка - Горєва.

Варто розглянути перехідні процеси в синхронній машині з демпферними обмотками й без них. При цьому необхідно навчитися становити схеми заміщення синхронних машин і будувати їхні векторні діаграми, що відповідають перехідним режимам. Особливу увагу потрібно звернути на з'ясування фізичної сутності перехідних і надперехідних ерс й індуктивних опорів, на розходження між ними, а також на їхню відмінність від ерс й опорів обертових машин при нормальному режимі. Значення зазначених параметрів для різних типів синхронних генераторів і двигунів.

Ознайомитись з рівнянням перехідного процесу в асинхронному двигуні. Особливості розрахунків перехідних процесів двигунів. Визначення розрахункових параметрів двигунів. Поняття про узагальнений електродвигун і його облік при розрахунку струмів КЗ.

Узагальнене навантаження та його вплив на перебіг перехідного процесу. Надперехідна ерс й опір узагальненого навантаження та їх облік при розрахунках перехідних процесів у СЕС ([I], с. 144 – 230).

Запитання для самоперевірки

- 1.Скласти диференціальні рівняння перехідного процесу синхронної машини.
2. Чому змінюється магнітний потік у повітряному зазорі машини в перехідному режимі?
3. Які ерс, опори та машини називаються перехідними?
4. Які ерс й опори машини називаються над перехідними?
- 5.Побудувати схему заміщення синхронної машини без демпферних обмоток.

6. Побудувати векторну діаграму синхронної машини без демпферних обмоток.

7. Як впливають демпферні обмотки на перебіг перехідного процесу в обертовій машині?

8. Побудувати схему заміщення синхронної машини з демпферними обмотками.

9. Побудувати векторну діаграму синхронної машини з демпферними обмотками.

10. Вивести рівняння Парка - Горєва.

11. У чому полягають особливості розрахунків перехідних процесів двигунів?

12. Як враховується вплив узагальненого навантаження на перебіг перехідного процесу?

1.4. Перехідні процеси в системі електропостачання при раптових трифазних коротких замиканнях

У цій темі розглядаються зміни повного струму КЗ і його складових у короткозамкнутому ланцюзі при раптових ушкодженнях у різних точках системи електропостачання.

Необхідно спочатку розглянути криві зміни повного струму КЗ і його складових при раптовому трифазному КЗ на затисках джерела живлення або поблизу розміщених точок за відсутності автоматичного регулятора збудження (АРЗ).

Після розгляду кривих струму при відсутності АРЗ потрібно розглянути такі ж криві при наявності в синхронних машин АРЗ, зіставити їх й установити причини впливу АРЗ на зміну періодичної складової струму КЗ.

Велика увага повинна бути приділена раптовим КЗ у вилучених точках мережі. Для цього потрібно знати, яка точка СЕС називається вилученою, і побудувати для неї криві зміни періодичних, аперіодичної складових і повного струму КЗ. При вивченні варто докладно зупинитися на розгляді сталого струму КЗ, його можливих значеннях і способах визначення ([1], с. 112 – 130, 91 – 109).

Запитання для самоперевірки

1. Як змінюються криві періодичних, аперіодичної складових і повного струму при КЗ на затисках генератора без АРЗ?
2. Який струм називають ударним струмом КЗ?
3. При яких умовах ударний струм набуває максимального значення?
4. Як визначається діюче значення повного струму КЗ за перший період перехідного процесу?
5. Що являє собою ударний коефіцієнт струму КЗ і як він визначається?
6. Як змінюються криві повного струму КЗ і його складових при ушкодженні на затисках генератора з АРЗ?
7. Вплив АРЗ на процеси перебігу КЗ.
8. Як змінюються криві повного струму і його складових при КЗ у вилученій точці?
9. Криві зміни повного струму і його складових, що генерується електродвигунами.

1.5. Практичні методи розрахунку струмів трифазного короткого замикання

Метод розрахунку струмів симетричного трифазного КЗ залежить від місця розглянутого ушкодження в СЕС, призначення виконуваного розрахунку, моменту часу тощо. При вивченні практичних методів розрахунку струмів КЗ необхідно засвоїти, у яких випадках потрібно застосовувати спрощені, а в яких – точні методи. Треба, насамперед, ознайомитися зі спрощеними способами обліку СЕС. Якщо КЗ розглядається у вилученій точці СЕС, діюче значення напруги в ланцюзі приймають

незмінним і визначають періодичну складову струму КЗ як постійну величину для будь-якого моменту перехідного процесу. Надперехідний струм КЗ, що відповідає початковому надперехідному режиму, визначають аналітично за надперехідними значеннями ерс й опорів короткозамкненого ланцюга при КЗ у будь-якій точці СЕС.

Струми КЗ для довільних моментів перехідного режиму визначають методом розрахункових кривих або спрямлених характеристик. При цьому звертають увагу на те, що розрахунковими кривими можна користуватися тільки тоді, коли опір короткозамкненого ланцюга зведено до номінальної потужності джерела живлення, тобто є розрахунковим опором. Оскільки розрахункові криві побудовані з урахуванням навантажень, при визначенні розрахункового опору не слід включати в розрахункову схему гілки навантажень.

У випадку живлення точки КЗ від різнотипних джерел живлення або з різною відстанню від місця ушкодження, потрібно визначати струми КЗ із урахуванням індивідуального загасання їхньої періодичної складової.

Важливе значення при практичних розрахунках струмів КЗ має врахування електродвигунів й узагальнених навантажень як додаткових джерел електроенергії. При визначенні струмів КЗ і СЕС потрібно приділити значну увагу особливостям їхнього розрахунку в мережах напругою до 1000 В.

Істотне значення при вивченні практичних методів розрахунку струмів КЗ має надбання навичок користування розрахунковими моделями й ЕОМ.

Запитання для самоперевірки

1. У яких випадках потужність джерела живлення можна приймати нескінченною?
2. Як визначають початковий струм КЗ?

3. Як визначають ударний струм КЗ?
4. Як визначають струми КЗ методом розрахункових кривих?
5. Коли необхідно визначити струми КЗ із урахуванням індивідуального загасання періодичної складової від різних джерел?
6. Як визначають струми КЗ у вилучених точках СЕС?
7. Особливості розрахунку струмів КЗ у мережах напругою до 1000 В.
8. Як визначають струми КЗ із урахуванням електричних двигунів?
9. Як визначають струми КЗ за допомогою розрахункових моделей?
10. Методи визначення струмів КЗ за допомогою обчислювальних машин ([I], с. 230 – 263).

1.6. Основні положення при дослідженні несиметричних перехідних процесів

Для розрахунку несиметричних перехідних процесів необхідно детально ознайомитися із застосуванням методу симетричних складових до аналізу й розрахунку несиметричних КЗ. При цьому необхідно засвоїти способи подання несиметричних струмів, напруг й інших параметрів через симетричні складові прямих, зворотних і нульових послідовностей і навпаки.

При вивченні даної теми потрібно звернути особливу увагу на опори елементів СЕС для струмів окремих послідовностей, а також на складання розрахункових схем і схем заміщення для визначення результуючих опорів прямої, зворотної й нульової послідовностей ([I], с. 272 – 311).

Запитання для самоперевірки

1. Як представити несиметричну систему струмів у вигляді трьох симетричних?
2. Опори прямої, зворотної й нульової послідовностей різних елементів короткозамкненого ланцюга.
3. Як складаються розрахункові схеми різних послідовностей короткозамкненого ланцюга при несиметричних КЗ?
4. Як визначаються результуючі опори послідовностей?
5. У яких одиницях задаються опори елементів різних послідовностей?
6. Особливості схеми заміщення нульової послідовності.

1.7. Однократна поперечна несиметрія

При вивченні даної теми важливо набути навичок у складанні розрахункових схем і схем заміщення прямої, зворотної й нульової послідовностей, уміти визначати розрахункові опори коротко–замкненого ланцюга при різних видах несиметричних КЗ.

Варто звернути увагу на те, що гілки навантаження являють собою додаткові шляхи для протікання струмів зворотної послідовності й тому повинні включатися до відповідної схеми заміщення.

Оскільки в точці несиметричного КЗ трифазний ланцюг не ділиться на окремі незалежні частини (залишаються зв'язані через неушкоджені фази), струми прямої й зворотної послідовності розподіляються в ланцюзі по-різному.

Передбачається вивчення методів розрахунку однофазного й двофазного КЗ, а також двофазного КЗ на землю. При цьому необхідно розглянути векторні діаграми струмів і напруг при несиметричних КЗ.

Розглядаючи однократну поперечну несиметрію, потрібно враховувати, що розподіл симетричних складових струмів і напруг справедливий тільки в межах того щабля трансформації, на якій розглядається несиметричне КЗ. Струми й напруги на інших щаблях трансформації необхідно визначати з урахуванням правил трансформації їхніх окремих складових.

У цій же темі потрібно вивчити правило еквівалентності прямої послідовності й комплексних схем заміщення, що поєднують між собою схеми окремих послідовностей.

Для практичних розрахунків несиметричних КЗ важливе значення має набуття навичок у використанні методу розрахункових кривих, побудованих для симетричного трифазного КЗ.

([I], с. 315 – 385).

Запитання для самоперевірки

1. Що таке однократна «поперечна несиметрія» ?
2. Яке розходження між розрахунковими схемами прямої, зворотної й нульової послідовностей?
3. Як визначити струми й напруги при однофазному КЗ?
4. Зобразити векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ.
5. Як визначити струми й напруги при двофазному КЗ?
6. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг при двофазному КЗ.
7. Як визначити струми й напруги при двофазному КЗ на землю?
8. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг при двофазному КЗ на землю.
9. У чому полягає правило еквівалентності прямої послідовності?
- 10.Що являють собою комплексні схеми заміщення?
- 11.Як визначаються струми несиметричних КЗ за розрахунковими кривими?

1.8. Однократна поздовжня несиметрія й складні види ушкоджень

Потрібно чітко представити розходження між поперечною й поздовжньою несиметріями та їхній вплив на перебіг перехідних процесів.

Варто розглянути методи визначення струмів і напруг при розривах однієї й двох фаз несиметрії від включення опорів. Для розглянутих випадків поздовжньої несиметрії потрібно вміти побудувати векторні діаграми струмів і напруг.

Для розрахунку однократної поздовжньої несиметрії за допомогою моделей й обчислювальних машин важливе значення має вміння становити комплексні схеми заміщення.

Вивчаючи дану тему, потрібно ознайомитися також із принципами розрахунку складних видів ушкоджень у СЕС, ([I], с. 385 – 410).

Запитання для самоперевірки

1. Які види несиметрії належать до однократної поздовжньої?
2. Як визначаються струми і напруги при розриві однієї фази?
3. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг при розриві однієї фази.

4. Як визначаються струми й напруги при розриві двох фаз?
5. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг при розриві двох фаз.
6. Як визначаються струми й напруги при несиметрії від включення опору?
7. Сформулювати правило еквівалентності прямої послідовності при однократній поздовжній несиметрії.
8. Що являють собою комплексні схеми заміщення?
9. Як визначаються струми й напруги при складних видах ушкодження?

1.9. Короткі замикання в особливих умовах

Вивчення електромагнітних перехідних процесів при КЗ в особливих умовах винесено в окрему тему, що враховує їхні специфічні особливості.

Коротко розглядаються КЗ у системах з лініями електропередачі напругою 330 кВ і вище. Оскільки в СЕС широко використовуються АПВ, важливе значення має визначення струмів і напруг при автоматичному повторному включенні. Оскільки в деяких галузях промисловості і комунальному господарстві широко використовуються мережі постійного струму й підвищеної частоти, варто ознайомитися зі специфікою розрахунків струмів КЗ у таких мережах.

Особливу увагу необхідно приділити перехідним процесам, які виникають при замиканнях на землю в мережах з ізольованою нейтраллю ([I], с. 457 – 476).

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягають особливості розрахунку струмів КЗ у ЛЕП напругою 330 кВ і вище?
2. Як впливає АПВ на струми КЗ?
3. Як визначаються струми КЗ у мережах постійного струму?
4. Як протікає перехідний процес при КЗ у мережах підвищеної частоти?
5. Зіставити струми КЗ у мережах промислової й підвищеної частоти.
6. Які виникають струми й напруги при замиканнях на землю в мережах з ізольованою нейтраллю?
7. Вплив замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю на електробезпечність.

1.10. Рівень струмів короткого замикання

При проектуванні й експлуатації СЕС одним з важливих завдань є визначення оптимальних рівнів струмів КЗ. Тому необхідно звернути увагу на якість перехідних процесів, що визначає рівні струмів КЗ у різних точках СЕС.

Варто детально ознайомитися зі способами обмеження струмів КЗ, що дозволяють досягати їхніх необхідних рівнів. На вибір способів обмеження струмів КЗ істотно впливають засоби обмеження й область їхнього застосування. Тому питання визначення способів і засобів обмеження струмів КЗ повинні бути досить вивчені при розгляді перехідних процесів у СЕС.

Особливу увагу при цьому потрібно приділити оптимізації рівнів струмів КЗ й їхній координації, від яких істотно залежать техніко-економічні показники й надійність експлуатації систем електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства.

Запитання для самоперевірки

1. Якими показниками визначається якість перехідного процесу?
2. Які існують способи обмеження струмів КЗ й області їхнього застосування?
3. Які засоби обмеження струмів КЗ застосовуються в СЕС?
4. Що таке «оптимізація рівнів КЗ»?
5. Як досягається оптимізація рівнів КЗ у системах електропостачання?
6. Що розуміють під координацією рівнів КЗ і як вона досягається?

РОЗДІЛ 2. ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЇЇ ВИКОНАННЯ

2.1. Загальні положення

Курсова робота передбачає виконання розрахунків й аналіз найпоширеніших електромагнітних перехідних процесів, обумовлених короткими замиканнями в системах електропостачання. Коротке замикання (КЗ) – це порушення нормального режиму роботи системи електропостачання, викликане замиканням фаз між собою, а в системах із заземленою нейтраллю – також замиканням фаз на землю.

Розрахунок електромагнітного перехідного процесу в сучасній системі електропостачання з урахуванням всіх умов і факторів надзвичайно складний і практично нездійснений. Щоб спростити завдання, вводять розрахункові умови й ряд допущень. Під розрахунком електромагнітного перехідного процесу звичайно розуміють обчислення значень струмів, напруг і потужностей у розглянутій схемі електричної мережі при заданих розрахункових умовах.

Вихідні розрахункові умови, вимоги до точності розрахунків, прийняті допущення визначаються цільовим призначенням виробленого на практиці розрахунку електромагнітного перехідного процесу. Так, наближені розрахунки струмів короткого замикання припустимі при виборі апаратів і провідників за умовами короткого замикання, що пов'язано з більшим кроком у шкалі струмів відключення комутаційних апаратів. Обґрунтування розрахункових умов для конкретних технічних завдань є одним з важливих питань відповідних спеціальних дисциплін із проектування й експлуатації систем електропостачання й не розглядається в даних методичних вказівках.

Розрахункові умови для виконання курсової роботи (розрахункова схема мережі, види КЗ, місце розташування КЗ, моменти КЗ) визначені у завданні, а можливі допущення – у методичних вказівках до кожного етапу виконання розрахунків струмів КЗ.

Строки видачі й виконання завдань на курсову роботу встановлюються відповідно до існуючого робочого навчального плану спеціальності.

При виконанні курсової роботи розрахунки й перетворення електричних схем необхідно вести послідовно й супроводжувати відповідними поясненнями.

Рисунки повинні задовольняти вимоги ГОСТів, позначення й індекси параметрів схем і режимів систем електропостачання – відповідати загальноприйнятим правилам.

Обчислення потрібно організувати так, щоб була мінімальна витрата часу на них і найменша кількість помилок, можна було легко й швидко відшукати допущені помилки. Точність розрахунку можна вважати задовільною до третьої значущої цифри після коми.

Для прискорення розрахунків і зменшення кількості помилок рекомендуються всі результати розрахунку записувати у вигляді таблиць. При використанні для розрахунку струмів КЗ засобів обчислювальної техніки навести блок-схеми алгоритмів і програми розрахунку, опис і контрольний приклад розрахунку для однієї із точок КЗ.

2.2. Процес короткого замикання

Короткі замикання можуть відбуватися в електричних ланцюгах, що одержують живлення від джерел необмеженої й обмеженої потужності. В електричній системі або станції необмеженої потужності ($S_c = \infty$) напруга на шинах практично незмінна при коротких замиканнях у будь-якій точці підключеного ланцюга. Опір такої системи $X_c = 0$. У системі обмеженої

потужності ($S_c \neq \infty$), що має опір $X_c \neq 0$, при невилучених КЗ напруга на шинах зменшується. Дальність точки КЗ характеризується сумарним опором всього короткозамкненого ланцюга.

Симетричність трифазних КЗ дозволяє розглядати зміну струмів і напруг тільки в одній фазі, а в розрахунках використовувати однолінійні схеми заміщення й значення опорів фаз елементів ланцюга КЗ. При виникненні КЗ опір ланцюга зменшується, а сила струму збільшується.

Внаслідок наявності індуктивності при виникненні КЗ у короткозамкненому ланцюзі протікає перехідний процес. Струм КЗ змінюється у процесі короткого замикання (рис .1) за складним законом, що залежить від багатьох факторів: потужності джерела живлення, активного опору КЗ ланцюга, наявності автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) на генераторах і т.п.

Перехідний процес характеризується наявністю двох струмів періодичного I_n й аперіодичного i_a), що складають струм КЗ.

Періодичний струм I_n протікає під дією напруги мережі. У системах необмеженої потужності напруга джерела незмінна, тому амплітуда періодичного струму I_{nt} упродовж усього процесу постійна (рис. 1, в). Діюче значення розглянутої складової для всіх моментів:

$$I'' = I_{nt} = I_{\infty} = I_{nm} / \sqrt{2}. \quad (1)$$

Для генераторів з АРЗ (рис.1,б) зниження напруги на виводах генератора при КЗ викликає дію АРЗ, що збільшує струм порушення. Внаслідок інерційної дії АРЗ помітно лише через 0,08...0,3 с. Через спад сили періодичного струму у перші періоди після виникнення КЗ, подібний до зміни періодичної складової струму КЗ для генератора без АРВ. Підвищення порушення приводить до зростання ерс генератора й періодичної складової струму статора до сталого значення.

Тривалість несталого процесу в цьому випадку визначається часом зміни періодичної складової струму статора від початкового значення $I_{nm}(t=0)$ до сталого:

$$I_{nm}(t=\infty) = \sqrt{2}I_{\infty}. \quad (2)$$

При коротких замиканнях у ланцюзі, що живиться від станції обмеженої потужності, коли точка КЗ не вилучена, періодичний струм I_n змінюється за гармонійною кривою із загасаючою за часом амплітудою від найбільшого значення I_M до сталого $\sqrt{2}I_{\infty}$. У цьому випадку $I'' \neq I_{nt} \neq I_{\infty}$ (рис. 1,а). Для генератора без АРВ зі зникненням аперіодичної складової несталий процес не закінчується, тому що періодична складова струму КЗ змінюється більш тривалою. При усуненні КЗ у мережі напруга на затискачах генератора (станції) практично не змінюється, але АРЗ вступає в дію. Періодичний струм залишається незмінним з моменту замикання, тобто $I'' = I_{nt} = I_{\infty}$ (рис. 1,в).

Сила аперіодичного струму КЗ змінюється за експонентною кривою, обумовленою рівнянням:

$$i_a = i_{at=0} e^{\frac{-t}{T_a}}. \quad (3)$$

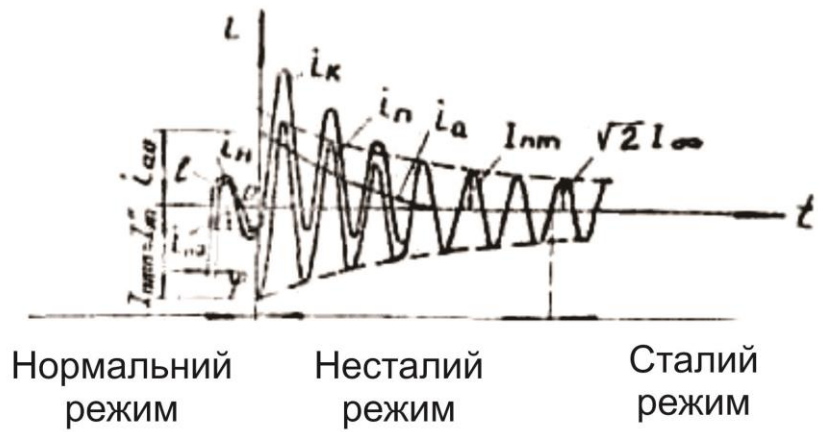
Постійна часу:

$$T_a = \frac{L}{r} = \frac{x}{\omega \cdot r} = \frac{x}{314 \cdot r}, \quad (4)$$

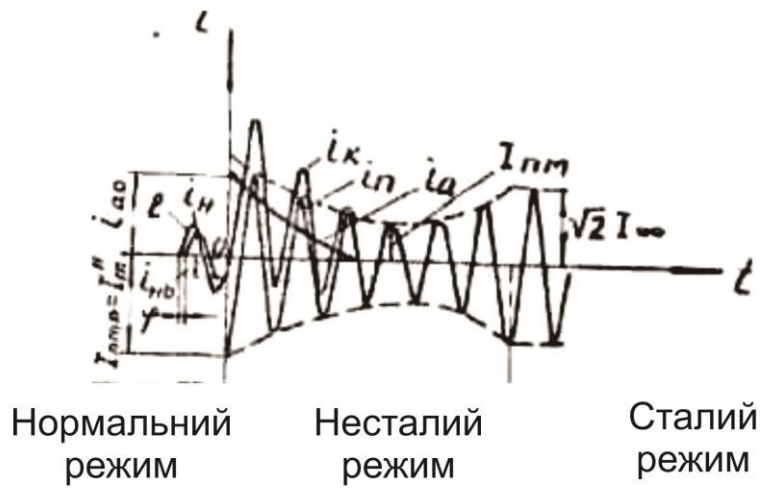
де r, x – відповідно активний й індуктивний опір ланцюга КЗ; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; L – індуктивність.

Якщо до КЗ навантаження в ланцюзі було відсутнє ($i_{nt=0} = 0$), а КЗ відбулося в момент $U = 0$, то $i_{nt=0} = I_{nm}$ й початкове значення сили аперіодичного струму буде найбільшим:

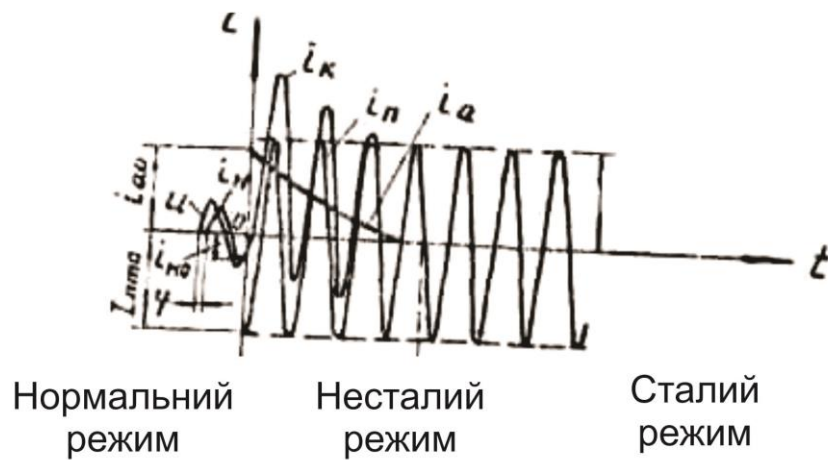
$$i_{at=0} = -I_{nm}. \quad (5)$$



а



б



в

Рис. 1. Характеристики переходного процесу при КЗ на шинах генератора без АРЗ (а), генератора з АРЗ (б) та віддаленого КЗ (в)

Ця умова є розрахунковою для визначення найбільшого значення сили струму в ланцюзі – сили ударного струму короткого замикання i_y приблизно через півперіода (0,01 с) з моменту виникнення КЗ. Значення його сили дорівнює сумі значень сили періодичного й аперіодичного струмів:

$$i_y = i_{at=0,01} + I_{nm}, \quad (6)$$

або

$$i_y = I_{nm} \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right) = K_y \sqrt{2} I'', \quad (7)$$

де $K_y = \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right)$, – ударний коефіцієнт струму КЗ.

У мережах напругою вище 1000 В постійна часу T_a звичайно становить 0,05 с, $K_y = 1,8$ й ударний струм:

$$i_y = 1,8 \sqrt{2} I'' = 2,55 I''. \quad (8)$$

Діюче значення повного струму за перший період після настання КЗ

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}, \quad (9)$$

при $K_y = 1,8$ справедливо $I_y = 1,51 I''$.

2.3. Побудова розрахункової схеми й схеми заміщення

Для обчислення струмів КЗ складається розрахункова схема, що відповідає нормальному режиму роботи системи електропостачання (всі міжсекційні вимикачі, крім обговорених у завданні, перебувають у розімкнутому стані). На цій схемі зображують всі елементи системи електропостачання з позначенням їхніх типів і номінальних параметрів, які повинні бути враховані в короткозамкненому ланцюзі. У розрахункову схему вводяться джерела живлення (живильна система, генератори) і всі елементи системи електропостачання (силові трансформатори, автотрансформатори,

повітряні й кабельні лінії, реактори), через які протікає струм аварійного режиму.

Додаткові джерела живлення точки КЗ – синхронні компенсатори й великі синхронні двигуни (потужністю 1 МВА і більше) – варто враховувати тільки в тих випадках, коли вони мають певну електричну віддаленість від місця КЗ й їх участь істотна (умови їхнього врахування відображенні в розд.2.5).

Асинхронне навантаження в розрахункову схему не вносять. Його вплив враховується тільки в початковий момент при визначенні ударного струму КЗ і тільки в тих випадках, коли воно підключено безпосередньо до місця КЗ.

Однією з особливостей розрахунку струмів КЗ у розподільних мережах є те, що в системі електропостачання існують кабельні лінії із провідниками малих перерізів. Це приводить до необхідності обліку активних опорів.

Активні й реактивні опори ліній визначаються з питомих активних і реактивних опорів. Звичайно активний опір ланцюга КЗ враховується тільки при співвідношенні $r_{рез} \geq 0,3 X_{рез}$, де $r_{рез}$ і $X_{рез}$ – відповідно результуючі активні й реактивні опори ланцюга до місця КЗ.

Опору електричних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів й ін.), а також з'єднувальних кабелів і шин у розподільних пристроях не враховують через їхню незначну величину.

На розрахунковій схемі намічають розрахункові точки КЗ відповідно до завдання. На рис. 2 як приклад показана розрахункова схема із зазначенням характерних місць КЗ.

За розрахунковою схемою формують в однолінійному зображенні схему заміщення. Для цього всі без винятку елементи розрахункової схеми замінюють відповідними електричними опорами, а джерела живлення, крім

того, ще й ерс. При складанні схеми заміщення використовують запис опорів дробом: у чисельнику вказується порядковий номер елементів, у знаменнику – значення опору.

Визначення опорів схеми заміщення у практичних розрахунках зводиться до приведення параметрів всіх елементів різних рівнів трансформації розрахункової схеми до одного (базисного) рівня, прийнятого за основний.

При цьому потрібно мати на увазі, що розрахунок опорів елементів ланцюга КЗ може бути виконаний в іменованих і відносних одиницях. За базисну напругу приймається середня номінальна напруга того електричного щабля, для якого визначається сила струму КЗ.

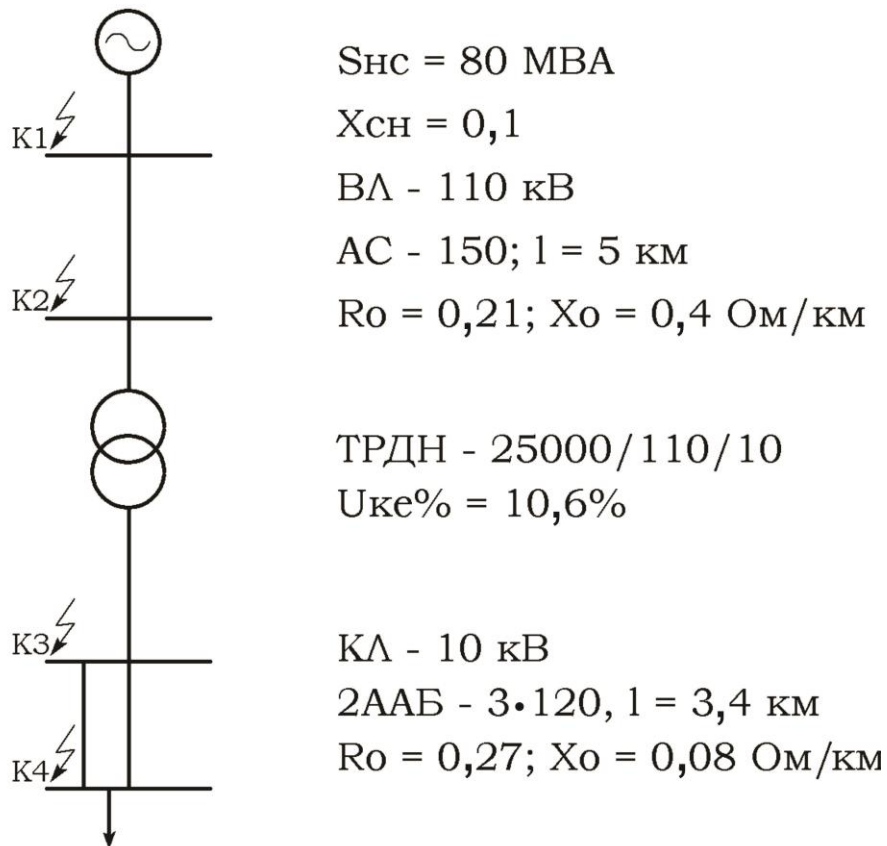


Рис. 2. Розрахункова схема з розміщеними розрахунковими точками

Шкала середніх номінальних напруг: 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23; 0,127 кВ. Базисну

потужність S_{δ} варто вибирати в кожному конкретному випадку, виходячи з міркувань скорочення обчислень. Звичайно за базисну потужність приймають потужність системи, трансформаторів підстанції або зручне для розрахунків число, кратне 10 (100, 1000 МВА і т.д). Базисний струм визначається за формулою:

$$I_{\delta} = S_{\delta} / (\sqrt{3} U_{\delta}). \quad (10)$$

2.4. Опір елементів схеми заміщення КЗ ланцюга

Методика визначення опорів елементів схеми заміщення в іменованих і відносних одиницях та їхнє приведення (точно й наближене) до базисної напруги досить широко й доступно описана у всіх джерелах літератури за розрахунками струмів КЗ ([1], с.28–46; [3], с.21 – 41).

При визначенні опорів елементів схеми заміщення, приведених до базисної напруги, для кожного елемента схеми заміщення потрібно виконати дві розрахункові операції:

Виразити опір елемента в прийнятих за розрахункові (іменованих або відносних) одиницях.

Привести опір після операції 1 до базисної напруги, використавши формулу приведення для опорів:

$$\bar{x} = x \cdot (K_1 \dots K_n)^2 \quad (11)$$

де $K_1 \dots K_n$ – коефіцієнти трансформації трансформаторів, що перебувають між розглянутим елементом і базисним рівнем напруги, обумовлені для кожного трансформатора в напрямку від базисного ступеня до ступеня елемента. При наближеному приведенні (з використанням середніх шкальних рівнів напруг) добуток коефіцієнтів трансформації

представляється відношенням базисної напруги до напруги елемента, опір якого розраховується.

Для даних, показаних на рис. 2, прийнявши $S_{\delta} = 100$ МВА і $U_{\delta} = 10,5$ кВ, розрахуємо схему заміщення в іменованих і відносних одиницях, проробивши над кожним елементом дві операції, зазначені раніше.

При розрахунку в іменованих одиницях:

Система

$$\bar{x}_c = x_{c*H} Z_{nc} K_1^2 = x_{cn} \frac{U_{nc}^2}{S_{nc}} \left(\frac{U_{\delta}}{U_{nc}} \right)^2 = 0,1 \frac{115^2}{80} \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,138 \text{ Ом}.$$

Повітряна лінія

$$\bar{x}_{nl} = x_{онл} l_{nl} K_1^2 = x_{онл} l_{nl} \left(\frac{U_{\delta}}{U_{нл}} \right)^2 = 0,4 \cdot 5 \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,017 \text{ Ом};$$

$$r_{nl} = r_{онл} l_{nl} K_1^2 = 0,21 \cdot 5 \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,009 \text{ Ом}.$$

Трансформатор

$$\begin{aligned} \bar{x}_{mp} &= \frac{u_{кз} \%}{100\%} Z_{нmp} K_t^2 = \frac{u_{кз} \%}{100\%} \cdot \frac{U_{нmp}^2}{S_{нmp}} \left(\frac{U_{\delta}}{U_{нmp}} \right)^2 = \\ &= \frac{10,6}{100} \cdot \frac{115^2}{25} \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,467 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Кабельна лінія

$$\bar{x}_{кл} = x_{0кл} \cdot l_{кл} = 0,08 \cdot 3,4 = 0,272 \text{ Ом};$$

$$\bar{r}_{кл} = r_{0кл} \cdot l_{кл} = 0,27 \cdot 3,4 = 0,918 \text{ Ом}.$$

Схема заміщення показана на рис. 3.

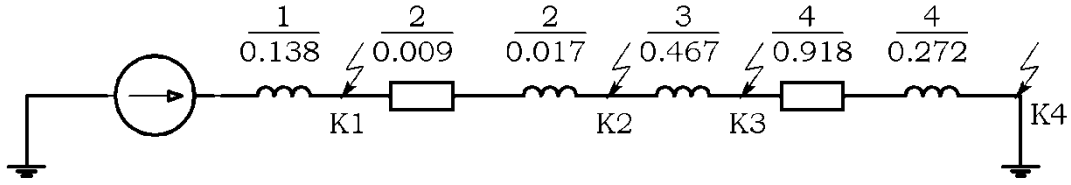


Рис. 3. Схема заміщення

При розрахунку у відносних одиницях:

Система

$$\begin{aligned}\bar{x}_{c*\delta} &= x_{c*н} \cdot \frac{Z_{нс}}{Z_{\delta}} K_1^2 = x_{c*н} \cdot \frac{U_{нс}^2}{S_{нс}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \left(\frac{U_{\delta}}{U_{нс}} \right)^2 = \\ &= 0,1 \cdot \frac{115^2}{80} \cdot \frac{100}{10,5^2} \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 1,125.\end{aligned}$$

Повітряна лінія

$$\begin{aligned}\bar{x}_{пл*\delta} &= \frac{x_{0пл} \cdot l_{пл}}{Z_{\delta}} \cdot K_1^2 = x_{0пл} \cdot l_{пл} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_{пл}} \right)^2 = \\ &= 0,4 \cdot 5 \cdot \frac{100}{10,5^2} \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,015;\end{aligned}$$

$$\bar{r}_{пл*\delta} = \frac{r_{0пл} \cdot l_{пл}}{Z_{\delta}} \cdot K_1^2 = 0,21 \cdot 5 \cdot \frac{100}{10,5^2} \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,008.$$

Трансформатор

$$\bar{x}_{тр*\delta} = \frac{u_{кз} \%}{100\%} \cdot \frac{Z_{нтр}}{Z_{\delta}} = \frac{u_{кз} \%}{100\%} \cdot \frac{U_{нтр}^2}{S_{нтр}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = \frac{10,6}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,424.$$

Кабельна лінія

$$\bar{r}_{кл*\delta} = \frac{r_{0кл} l_{кл}}{z_{\delta}} = 0,28 \cdot 3,4 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,83.$$

Схема заміщення показана на рис.4.

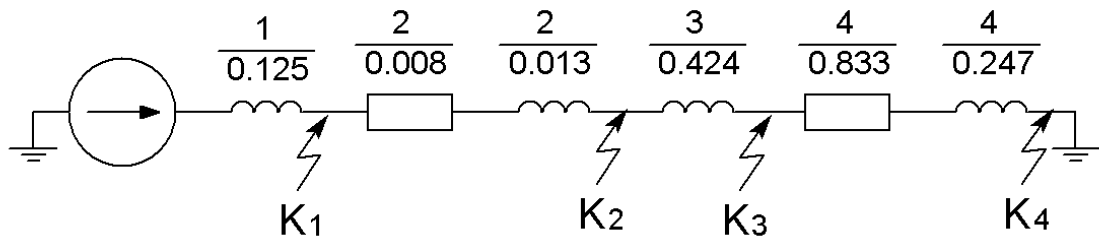


Рис. 4. Схема заміщення

2.5. Визначення результуючого опору схеми заміщення і струморозподілу в елементах системи електропостачання

Визначення результуючого опору схеми заміщення необхідне для визначення струмів КЗ. Воно полягає в поступовому перетворенні схеми заміщення до одного еквівалентного елемента, що має результуючий опір X_{pes} або X_{pes} й r_{pes} (рис. 5) від джерела (джерел) живлення до точки КЗ.

Основні способи спрощення схеми заміщення:

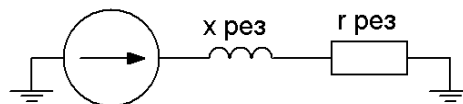


Рис. 5. Спрощена схема заміщення

1. Заміна паралельно, послідовно або змішано включених опорів елементів одним еквівалентним.
2. Перетворення трикутника в еквівалентну зірку або навпаки.
3. Нехтування активним опором при $r_{рез} \leq \frac{1}{3} x_{рез}$.
4. Заміна двох або декількох джерел живлення одним еквівалентним (наприклад, об'єднання двох електростанцій). Така заміна можлива лише у

випадку, коли джерела живлення перебувають приблизно в однакових умовах стосовно місця КЗ.

Для системи електропостачання промислових підприємств характерна схема живлення від системи S_1 (рис. 6) і місцевих джерел живлення S_2 й S_3 , (це можуть бути електростанції всередині підприємств), синхронні двигуни й компенсатори.

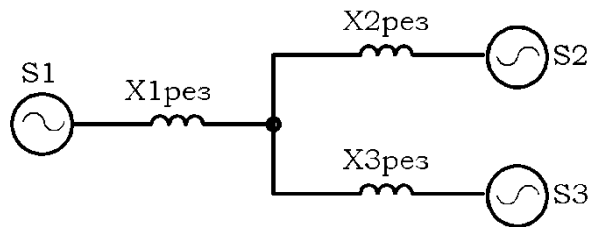


Рис. 6. Схема заміщення, характерна для промислових підприємств

При застосуванні методу розрахункових кривих місцеві джерела повинні бути виділені в окремі промені, що генерують, причому залежно від взаємного розташування цих джерел вони можуть бути об'єднані в меншу кількість віток.

Заміна двох або декількох джерел живлення одним генеруючим можлива в тих випадках, коли джерела живлення перебувають у приблизно однакових умовах стосовно місця КЗ.

Об'єднати джерела живлення можна за умови:

$$\frac{S_2 \cdot X_{2рез}}{S_3 \cdot X_{3рез}} = 0,4 \dots 2,5, \quad (12)$$

де S_2 , S_3 – потужності місцевих джерел живлення; $X_{2рез}$ і $X_{3рез}$ – результуючі опори, приведені до базисної потужності.

5.Нехтування малопотужними віддаленими джерелами живлення (синхронні компенсатори, синхронні або асинхронні двигуни).

Якщо одночасно виконуються умови

$$\frac{X_{2\text{рез}}}{X_{3\text{рез}}} \geq 20 \quad \text{і} \quad \frac{S_2}{S_1} \leq 0,05, \quad (13)$$

то джерелом S_2 (меншим за потужністю) можна знехтувати.

Якщо джерела живлення перебувають в умовах, що дуже різняться, відносно точки КЗ, наприклад, при різній електричній віддаленості генераторів, при різному типі генераторів (турбо– і гідрогенератори), при наявності й відсутності АРВ, то об'єднання джерел живлення вносить істотну помилку в розрахунки.

Розрахунок струморозподілу полягає у визначенні коефіцієнтів у струморозподілу в схемах заміщення, побудованих для кожної точки КЗ. Коефіцієнти струморозподілу обчислюють за відомими з теорії електричних кіл правилами й являють собою аварійні струми в елементах схеми заміщення, що складають частку від струму в місці КЗ, який приймається рівним одиниці. Їх визначають розбиранням схеми у зворотному напрямку, починаючи від її найпростішого виду, де коефіцієнт $C = 1$, до одержання шуканих коефіцієнтів.

Для двох віток коефіцієнти розподілу:

$$C_1 = \frac{X_{2*}}{X_{1*} + X_{2*}} C_{12}; \quad C_2 = \frac{X_{1*}}{X_{1*} + X_{2*}} C_{12},$$

де $C_{12} = C_1 + C_2$.

2.6. Розрахунок струмів трифазного КЗ у вказаних точках системи електропостачання

Розрахунок струмів КЗ необхідний для вибору й перевірки електроустаткування й струмоведучих частин, вибору засобів обмеження

аварійних струмів, проектування, настройки пристроїв захисту й автоматики.

При розрахунках струмів КЗ визначають:

- початковий надперехідний струм КЗ I'' ;
- ударний струм КЗ i_y для перевірки електричних апаратів, шин та ізоляторів на динамічну стійкість;
- найбільше діюче значення повного струму КЗ I_y , для перевірки електричних апаратів на стійкість протягом першого періоду дії КЗ;
- усталений струм КЗ I_∞ для перевірки термічної стійкості електричних апаратів, шин, прохідних ізоляторів і кабелів;
- діюче значення повного струму КЗ для різних моментів I_{kt} для вибору вимикачів високої напруги і налагодження релейного захисту;
- потужність короткого замикання S_{kt} для перевірки вимикачів за гранично допустимою вимикаючою потужністю.

При обмеженій потужності джерел живлення струми трифазного КЗ розраховуються за загальною або індивідуальною зміною, з використанням методу розрахункових кривих ([1], с.243–271; [4], с.50–59, [5], с.62; [6], с.243–262). Розрахунок за загальною або індивідуальною зміною визначається заданою системою електропостачання й можливістю об'єднання в ній джерел живлення.

Розрахунок за загальною зміною

Для симетричних схем, яким характерні однотипність генераторів і приблизно однакова електрична віддаленість КЗ, що справедливо при великій загальній віддаленості КЗ, знаходять загальну зміну аварійного струму в місці КЗ.

Всі генератори, які беруть участь у живленні КЗ, замінюють одним генератором сумарної потужності. Визначають один результуючий

реактивний опір $x_{рез}$ схеми заміщення, необхідний для одержання розрахункової реактивності кола КЗ:

$$x_{роз*} = x_{рез*} \frac{S_{н\Sigma}}{S_{\bar{o}}}, \text{ або } x_{роз*} = x_{рез*} \frac{S_{н\Sigma}}{U_{\bar{o}}^2}; \quad (14)$$

де $S_{н\Sigma}$ – сумарна номінальна потужність джерел, МВ·А.

При $S_{\bar{o}} = S_{н\Sigma}$ результуючий опір є одночасно й розрахунковим, тобто $x_{роз*} = x_{рез*}$. За $x_{роз*}$, використовуючи розрахункові криві, знаходять періодичний струм КЗ I_{nt*} у відносних одиницях.

Розрахункові криві являють собою залежність $I_{nt*} = f(x_{роз*}, t)$. У міру віддаленості КЗ (збільшення розрахункового опору) розходження між струмами в часі стає меншим. Тому при $x_{роз*} > 3$ періодична складова струму КЗ залишається незмінною й дорівнює своєму початковому значенню. При $x_{роз*} \geq 1$ розрахункові криві для генераторів різних типів майже збігаються.

Періодичний струм трифазного КЗ для будь-якого моменту в іменованих одиницях

$$I_{kt}^{(3)} = I_{kt*} \cdot I_{н\Sigma}, \quad (15)$$

де $I_{н\Sigma} = S_{н\Sigma} / \sqrt{3} U_{\bar{o}}$ – сумарний номінальний струм джерел (джерела) живлення, приведений до ступеня базисної напруги $U_{\bar{o}}$.

Потужність короткого замикання

$$S_{kt}^{(3)} = I_{nt*} \cdot S_{н\Sigma}. \quad (16)$$

Якщо $X_{роз*} > 3$, тобто точка КЗ вилучена й потужність джерела живлення обмежена, періодичний струм і потужність КЗ незмінні протягом аварійного процесу й визначаються відповідно за формулами:

$$I''^{(3)} = I_{nt}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{н\Sigma} / X_{роз*}; \quad (17)$$

$$S''^{(3)} = S_{nt}^{(3)} = S_{\infty}^{(3)} = S_{н\Sigma} / X_{роз*}. \quad (18)$$

Якщо джерело живлення задане як джерело необмеженої потужності ($S_c = \infty$), діюче значення періодичного струму трифазного КЗ залишається також незмінним і визначається за формулами:

$$I^{(3)} = I_{nt}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{\bar{\sigma}} / X_{рез*}. \quad (19)$$

Розрахунок за індивідуальною зміною

Для асиметричних схем характерна різнотипність джерел живлення або різко відрізняється їх віддаленість від місця КЗ. У цьому випадку необхідно враховувати індивідуальну зміну струмів окремих генераторів або груп, що складаються з декількох генераторів.

Дійсну розрахункову схему замінюють умовною променевою (радіальною), кожен промінь якої відповідає виділеному генератору або групі генераторів і пов'язаний з місцем КЗ. Визначають реактивний опір x_{nj*} генеруючого j -променя. Для цього перетворенням схеми знаходять результуючий реактивний опір $x_{рез*}$, щодо місця КЗ і коефіцієнт розподілу C_{nj} j -променя.

Схему будь-якої складності досить звести не більш як двох віток, що генерують, з огляду на різнотипність генераторів і віддаленість однотипних генераторів. В окремі вітки також необхідно виділяти системи, задані параметрами вимикання апаратур, що вимикають, синхронні компенсатори й двигуни, які перебувають поблизу місця КЗ:

$$x_{розрп*} = x_{nj*} \frac{S_{\sum nj}}{S\delta} = \frac{x_{рез*}}{C_{nj}} \frac{S_{\sum nj}}{S\delta}. \quad (20)$$

Виходячи з розрахункових опорів кожного променя, за розрахунковими кривими визначають відносні струми кожного променя I_{nt*}

для відповідних моментів. Струм КЗ променя $I_{nj}^{(3)}$ і потужність КЗ $S_{nj}^{(3)}$ визначають за формулами (15) і (16).

Джерело необмеженої потужності виділяють в окрему вітку, для якої струм КЗ визначають відповідно до (19). Результируючий струм КЗ у точці КЗ дорівнює сумі струмів окремих променів з різними джерелами.

При виконанні роботи варто звернути увагу на те, яким способом задана живильна система. Так, система, задана сумарною номінальною потужністю джерел і розрахунковим результируючим опором всіх елементів її схеми, враховується як еквівалентний генератор сумарної потужності з її розрахунковим опором.

Система може бути задана початковою потужністю КЗ на шинах приєднання розподільної мережі до системи й розрахунковим опором до цих шин. Тоді використовують криві, знаходять цю потужність КЗ у відносних одиницях, а потім визначають номінальну потужність джерел живлення або знаходять її з виразу:

$$S_{nc} = S_k \cdot x_{c*}. \quad (21)$$

Якщо задано тип вимикача, встановленого на приєднанні підстанції підприємства до системи, за допомогою каталогу знаходять потужність відключення вимикача цього типу й приблизно приймають її за потужність КЗ, яку генерує система.

Якщо система живлення задана шинами нескінченної потужності, то вважають, що в точці приєднання розподільної мережі до системи прикладена незмінна напруга, а розрахунковий опір системи дорівнює нулю.

2.7. Врахування електродвигуна при розрахунку струмів короткого замикання

При розрахунку струмів КЗ в електроустановках напругою 3–10 кВ, що містять електродвигуни, варто враховувати тільки ті з них, які пов'язані з

місцем КЗ безпосередньо через лінійні реактори або лініями (кабельними або струмопроводами). Так, при КЗ у точці К1 схеми промислової підстанції, показаної на рис.7, потрібно враховувати струми тільки від двигунів, приєднаних до секції 1. Електродвигуни секції 2, пов'язані з аварійною секцією через обмотки здвоєного реактора ланцюга системи, враховувати не треба.

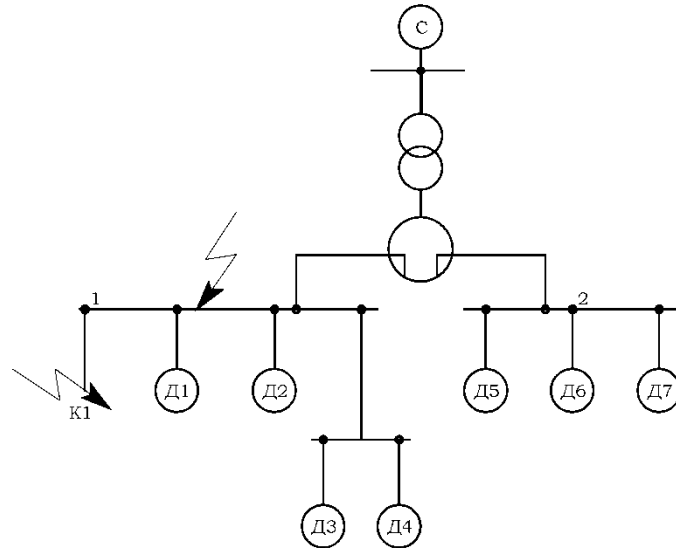


Рис. 7. Розрахункова схема промислової підстанції

Метод розрахунку струмів КЗ із урахуванням електродвигунів залежить від їх розміщення у розрахунковій схемі.

Розрізняють радіальну схему (рис.8,а) – двигуни пов'язані із точкою КЗ індивідуальним зовнішнім опором $Z_{внj}$, і складні схеми – точка КЗ перебуває за загальним для групи електродвигунів опором $Z_{вн}$ (рис.8,б) або загальним для двигунів і системи опором $Z_{вн}$ (рис. 8,в).

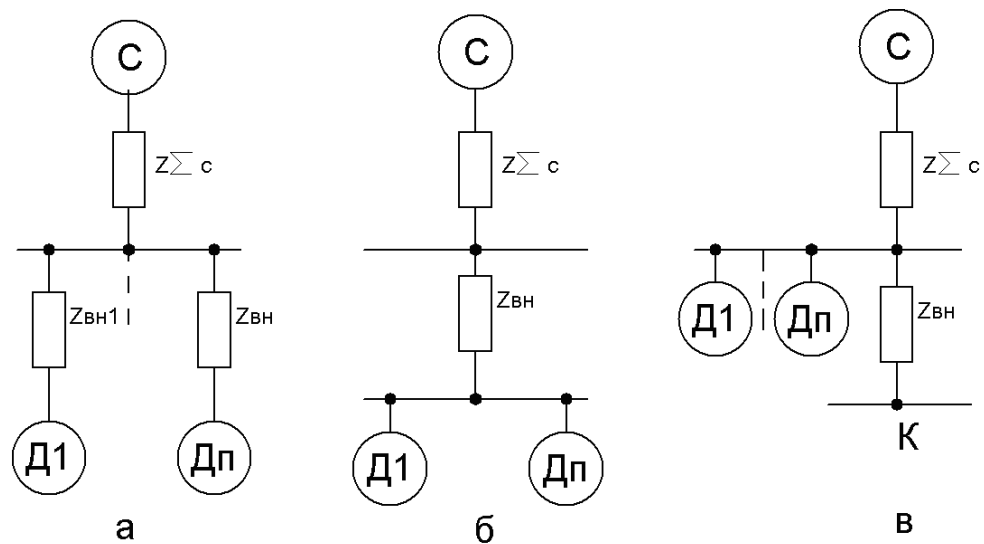


Рис. 8. Еквівалентні схеми заміщення радіальної структури (а), складні схеми з загальним опором для групи електродвигунів (б) або загальним для двигунів і системи опором (в)

Якщо за радіальною схемою включені різнотипні двигуни (асинхронні й синхронні з різними параметрами), їх варто враховувати індивідуально.

Початкове значення періодичної складової струму від асинхронного двигуна $I''_{ад}$ визначається через кратність його пускового струму $I_{пуск*}$, наведеного у каталозі.

При $Z_{вн*} < (0,1 \dots 0,2) x''_{ад*}$, де $x''_{ад*} = 1 / I_{пуск*}$, що характерно для кабелів довжиною не більше 300 м із площею перерізу не менше 50 мм²:

$$I''_{ад*} = I_{пуск*} * I''_{над}, \quad (22)$$

$$I''_{ад} = (I_{пуск*} * I''_{над}) / (1 + Z_{вн*} / x''_{ад*}), \quad (23)$$

де $I''_{над}$ – номінальний струм асинхронного двигуна.

Для двигунів серій ВДД і ДВДА струм $I''_{ад}$ приймається в 1,2 раза більшим значень, отриманих відповідно з виразів (22) і (23).

Початкове значення періодичної складової струму КЗ синхронного двигуна (базисні величини – номінальні значення струму й напруги двигуна):

$$I''_{cd} = E''_{cd} \cdot I_{ncd} / \sqrt{(x''_{d*} + x_{вн*})^2 + r_{вн*}^2}, \quad (24)$$

де E''_{cd*} – надперехідна ЕРС у початковий момент КЗ у відносних одиницях, яка дорівнює $\sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + x''_{d*})^2}$; I_{ncd} – номінальний струм синхронного двигуна, А або кА; x''_{d*} – над перехідний реактивний опір двигуна на поздовжній осі у відносних одиницях; $\cos \varphi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності в режимі збудження; $x_{вн*}, r_{вн*}$ – відповідно індуктивна й активна складова зовнішнього опору.

Для довільного моменту періодична складова струму КЗ від синхронних двигунів визначається за розрахунковими кривими або спеціальними кривими затухання.

При виконанні етапів 2.1–2.7 курсової роботи корисно ознайомитися з рішенням завдань 1.9– 1.15 з [2].

2.8. Розрахунок режиму несиметричного КЗ у вказаній точці системи електропостачання й побудова векторних діаграм струмів і напруг у точці несиметричного КЗ

Для виконання розрахунків струмів несиметричних КЗ необхідно використати принципи побудови схем окремих послідовностей і векторних діаграм струмів і напруг ([1], розд.ІІІ., [3], с.89–136).

Варто звернути увагу на те, що струми й напруги всіх послідовностей пропорційні струму прямої послідовності в точці КЗ. У свою чергу, струм прямої послідовності будь-якого несиметричного КЗ може бути визначений як струм при трифазному КЗ у точці, віддаленій від дійсної точки КЗ на додатковий опір $\Delta Z^{(1)}$, визначений видом КЗ. Для обчислення потрібно скласти схеми зворотної й нульової послідовностей. Тоді результуючий опір короткозамкненого ланцюга:

$$\text{для трифазного КЗ} - Z_{рез}^{(3)} = Z_{рез};$$

для однофазного КЗ $-Z_{pez}^{(1)} = Z_{pez1} + \Delta Z^{(1)} = Z_{pez1} + Z_{pez2} + Z_{pez0}$;

для двофазного КЗ $-Z_{pez}^{(2)} = Z_{pez1} + \Delta Z^{(2)} = Z_{pez1} + Z_{pez2}$;

для двофазного на землю $-Z_{pez}^{(1,1)} = Z_{pez1} + \Delta Z^{(1,1)} = Z_{pez1} + \frac{Z_{pez2} \cdot Z_{pez0}}{Z_{pez2} + Z_{pez0}}$.

Опори Z_{pez1} , Z_{pez2} , Z_{pez0} являють собою результуючі опори схем заміщення відповідно прямої, зворотної й нульової послідовностей.

Розрахунок струму прямої послідовності повністю аналогічний розрахунку періодичної складової струму трифазного КЗ тільки вже при іншому результуючому опорі.

Для обчислень дійсного струму при несиметричному КЗ необхідно отримане значення струму помножити на коефіцієнт $m^{(n)}$, що залежить від виду КЗ:

$$m^{(3)} = 1; \quad m^{(1)} = 3; \quad m^2 = \sqrt{3}; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{Z_{\delta\delta\zeta 2} Z_{\delta\delta\zeta 0}}{(Z_{\delta\delta\zeta 2} + Z_{\delta\delta\zeta 0})^2}}.$$

Після визначення струму прямої послідовності можуть бути визначені всі симетричні складові струмів і напруг у місці КЗ і струми й напруги у фазах у місці КЗ.

За відомими напругами послідовності однієї фази визначають напруги інших фаз і будують векторну діаграму.

РОЗДІЛ 3

ЗАВДАННЯ

Для виконання курсової роботи кожному студенту викладач видає особистий варіант згідно з табл.1. Згідно з варіантом студент формує розрахункову схему та виписує початкові параметри табл. 3.1– 3.7, за якими з довідників вибираються конкретні типи елементів схеми і визначаються їх паспортні дані, необхідні для розрахунків і побудові розрахункової схеми. Розрахункові криві показані в додатках.

У подальшому студент складає схему заміщення та за вказівкою викладача визначає розрахункові точки КЗ та розраховує:

- 1.1.Періодичну складову струму трифазного короткого замикання.
- 1.2. Ударний струм короткого замикання.
- 1.3. Потужність короткого замикання.
- 1.4. Періодичну складову та ударний струм короткого замикання з урахуванням двигунів і змішаного навантаження. Розрахунок періодичної складової струму короткого замикання проводити для моменту часу $t = 0$ та через n -секунд після початку перехідного процесу (за загальною або індивідуальною зміною) за типовими чи розрахунковими кривими. Відповідно до варіанта.
 - 2.1. Періодичну складову несиметричних струмів короткого замикання (відповідно до варіанта).
 - 2.2. Струми замикання на землю у мережі з ізольованої нейтраллю.
3. Струм короткого замикання у мережі до 1 кВ (вибір параметрів джерела – аналогічний вибору параметрів джерела живлення, що використовувались під час аналізу високовольтних мереж).
4. Термічну та електродинамічну стійкість для певних елементів.
5. Побудувати графічні залежності:
 - 5.1.Розподілу величини струму к.з. у функціональній залежності від відстані між місцем короткого замикання та джерелом електричної енергії.
 - 5.2 Розподілу значення потужності короткого замикання від електричної віддаленості від системи електропостачання.
6. Провести математичне моделювання наявної електричної системи в математичному пакеті MATLAB та зрівняти отримані результати.
7. Розрахувати й зрівняти струми в точці зазначеній викладачем, з обліком всі можливих факторів, для різних схем нормального режиму.

Розрахунок необхідно виконувати у іменованих та відносних одиницях.

Варіанти до виконання курсової роботи

№	Сх.	Відключені елементи у нормальному режимі	Тип завдання параметрів системи	До 1кВ	Тип навантаження в мережі до 1 кВ	№ варіанта завдання параметрів	Час T1	Час T2	K ⁽¹⁾ ізол. нейтраль
1	А	1,12,3,4,5,6,7,8	1	17	АД	1	0.09	0.3	1
2	А	1,2,3,4,5,6,7,8	2	18	СД	2	0.08	0.31	2
3	А	1,9,2,3,4,5,6,7,8	3	19	СМ	3	0.1	0.32	3
4	А	1,10,3,4,5,6,7,8	1	13	АД	4	0.15	0.33	4
5	А	1,11,2,4,5,6,7,8	2	15	АД	5	0.12	0.34	5
6	А	1,12,2,3,5,6,7,8	3	23	СД	6	0.11	0.35	6
7	А	1,9,2,3,4,6,7,8	1	24	СМ	7	0.13	0.36	7
8	А	1,10,2,3,4,5,7,8	2	25	АД	8	0.14	0.37	8
9	А	1,11,2,3,4,5,6,8	3	22	СД	1	0.16	0.38	1
10	А	1,2,3,4,5,6,7,10	1	20	СМ	2	0.17	0.39	2
11	А	1,2,3,4,5,6,7,12	2	21	АД	3	0.18	0.4	3
12	А	12,3,4,5,6,7,8	3	13	СД	4	0.19	0.3	4
13	А	2,3,4,5,6,7,8	1	17	СМ	5	0.2	0.31	5
14	А	9,2,3,4,5,6,7,8	2	18	АД	6	0.09	0.32	6
15	А	10,3,4,5,6,7,8	3	25	СД	7	0.08	0.33	3
16	Б	1,12,3,4,5,6,7,8	1	17	СМ	8	0.1	0.34	8
17	Б	1,2,3,4,5,6,7,8	2	18	АД	1	0.15	0.35	1
18	Б	1,9,2,3,4,5,6,7,8	3	19	СД	2	0.09	0.36	2
19	Б	1,10,3,4,5,6,7,8	1	20	СМ	3	0.08	0.37	3
20	Б	1,11,2,4,5,6,7,8	2	21	АД	4	0.1	0.3	4
21	Б	1,12,2,3,5,6,7,8	3	12	СД	5	0.15	0.31	5
22	Б	1,9,2,3,4,6,7,8	1	13	СМ	6	0.12	0.32	6
23	Б	1,10,2,3,4,5,7,8	2	14	АД	1	0.11	0.33	1
24	Б	1,11,2,3,4,5,6,8	3	22	СД	2	0.13	0.34	2
25	Б	1,2,3,4,5,6,7,10	1	15	СМ	3	0.14	0.35	3
26	Б	1,2,3,4,5,6,7,12	2	23	АД	4	0.16	0.36	4
27	Б	12,3,4,5,6,7,8	3	24	СД	5	0.17	0.37	5
28	Б	2,3,4,5,6,7,8	1	25	АД	6	0.18	0.38	6
29	Б	9,2,3,4,5,6,7,8	2	26	СД	7	0.19	0.39	7
30	Б	10,3,4,5,6,7,8	3	27	СМ	8	0.2	0.4	8

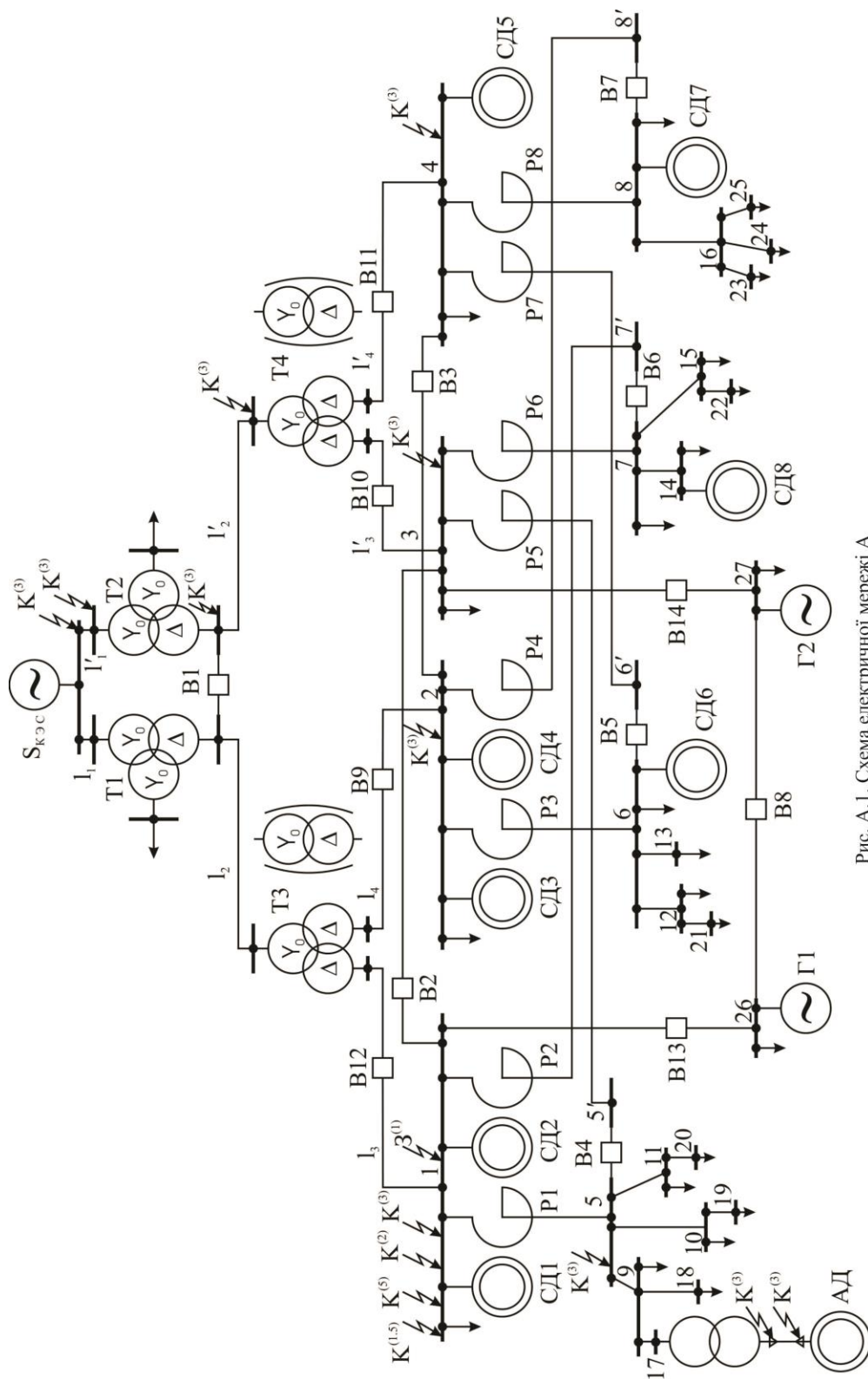


Рис. А.1. Схема електричної мережі А

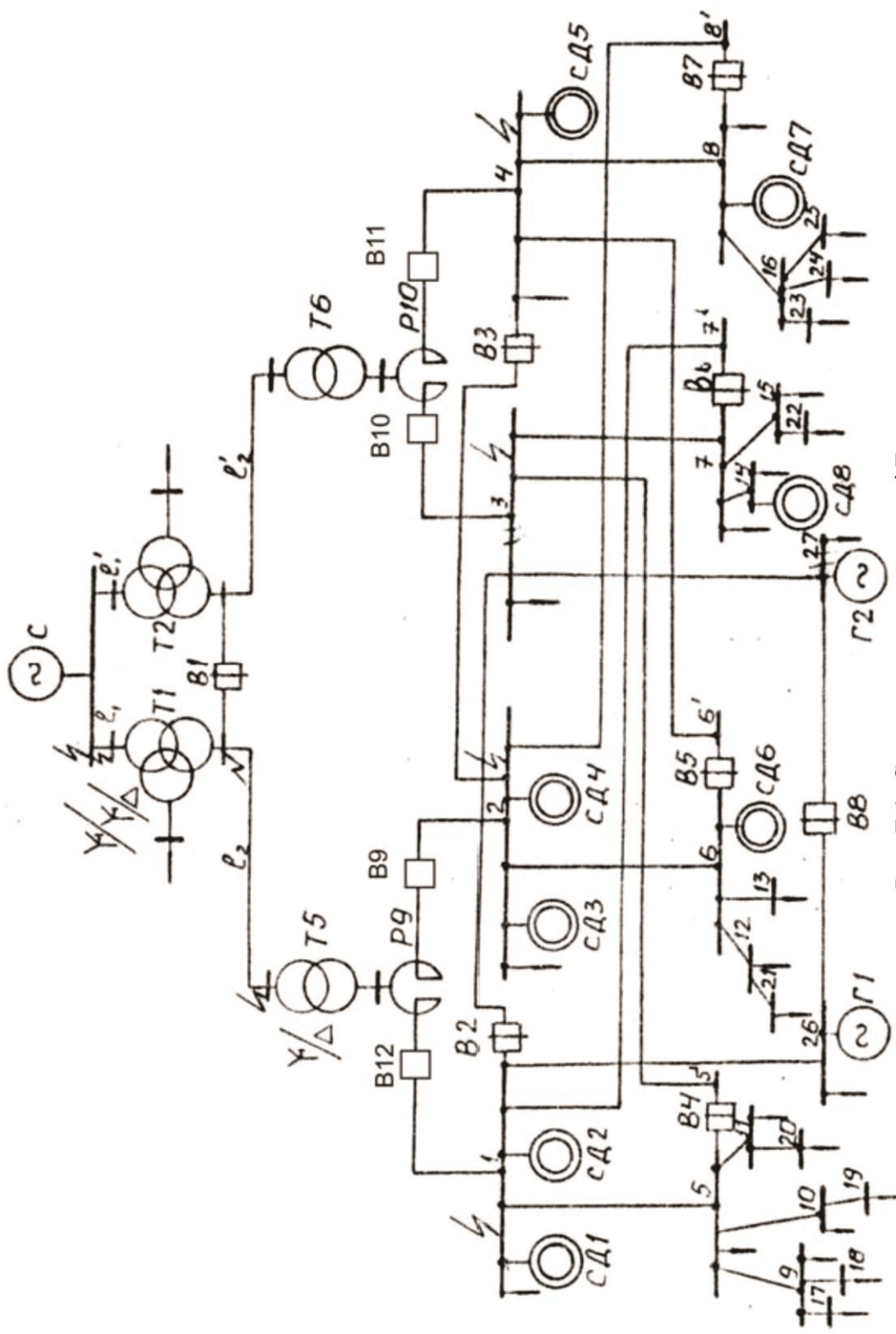


Рис. Б.1. Схема електричної мережі Б

3.1. Параметри джерела системи

Спосіб задання системи		Номер варіанта даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	$S_{Hсист}$	550	700	650	500	30 0	530	63 0	320
	x_c	0,15	0,2	0,25	0,18	0, 3	0,22	0, 27	0,25
II	$S_{KЗсист}$	150 0	110 0	130 0	140 0	95 0	150 0	12 00	900
	x_c	0,25	0,2	0,27	0,14	0, 3	0,15	0, 27	0,25
III	$S_c = \infty$	Система задана як джерело нескінченної потужності							

Примітки:

1. Реактивний опір системи задано в відносних одиницях та приведений до номінальних параметрів системи.
2. При заданій системі I і II способами за базисну потужність прийняти номінальну потужність системи.

3.2. Параметри генераторів

Генератори		Номер варіанта даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Г1,Г2	P_H , МВт	2,5	6,0	12,0	4,0	6,0	30	6,0	25
	U_H , кВ	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	6,3	10,5	6,3
	$\cos \varphi_H$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	x_d''	10,3	12,1	11,4	11,1	12,1	14,8	12,1	12,9

Примітки:

1. Опори генераторів наведені у відсотках і приведені до їх номінальних параметрів.
2. Генератори мають АРВ.

3.3. Параметри трансформатора

Трансформатори		Номер варіанта даних								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Т1	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	63	80	80	40	40	63	80	25	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	115	115	115	158	115	158	115	115
		СН	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
	НН	6,6	10,5	10,5	6,6	10,5	6,6	10,5	6,6	
Т2	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	63	80	80	40	40	63	80	25	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	115	115	115	158	115	158	115	115
		СН	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
	НН	6,6	10,5	10,5	6,6	10,5	6,6	10,5	6,6	
Т3	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	16	40	40	16	10	25	40	16	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75
		СН	6,3	–	6,3	6,3	–	6,3	10,5	6,3
	НН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	6,3	10,5	6,3	
Т4	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	16	40	40	16	10	25	10	16	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75	36,75
		СН	6,3	–	6,3	6,3	–	6,3	10,5	6,3
	НН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	6,3	10,5	6,3	
Т5	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	10	32	40	25	16	16	32	10	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	36,75	36,75	36,75	36,75	38,5	38,5	36,75	38,5
		СН	–	–	–	–	–	–	–	–
	НН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	6,3	10,5	6,3	
Т6	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$	10	32	40	25	16	16	32	10	
	$U_H, \text{кВ}$	ВН	36,75	36,75	36,75	36,75	38,5	38,5	36,75	38,5
		СН	–	–	–	–	–	–	–	–
	НН	6,3	10,5	6,3	6,3	10,5	6,3	10,5	6,3	

3.4. Параметри синхронних двигунів

Синхронні двигуни		Номер варіанта даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
СД1	$P_H, \text{МВт}$	0,4	2,0	0,63	0,315	4,0	1,0	2,0	1,6
	$U_H, \text{кВ}$	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
СД2	$P_H, \text{МВт}$	0,4	2,0	0,63	0,315	4,0	1,0	2,0	1,0
	$U_H, \text{кВ}$	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0

	кВ								
СД3	$P_{н,}$ МВт	1,0	3,2	1,6	0,32	1,6	1,25	3,2	1,0
	$U_{н,}$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
СД4	$P_{н,}$ МВт	1,0	3,2	1,6	0,315	1,6	1,6	3,2	1,25
	$U_{н,}$ кВ	6,0	6,0	6,0	6,0	10,0	6,0	6,0	6,0
СД5	$P_{н,}$ МВт	2,0	4,0	2,5	0,4	2,0	1,25	4,0	1,6
	$U_{н,}$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
СД6	$P_{н,}$ МВт	0,315	1,6	1,6	1,6	0,5	1,5	3,2	1,25
	$U_{н,}$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
СД7	$P_{н,}$ МВт	0,5	1,6	1,6	1,6	0,5	1,0	4,0	1,0
	$U_{н,}$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
СД8	$P_{н,}$ МВт	0,5	4,0	2,0	0,8	0,5	1,6	2,0	1,0
	$U_{н,}$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0

Примітки:

1. Синхронні двигуни СД1–СД5 мають АРВ.
2. Враховувати, що всі СД до КЗ працювали з повним номінальним навантаженням при номінальних коефіцієнтах потужності і напругах на затискачах.

3.5. Потужність навантажень

Навантаження, МВ·А	Номер варіанта даних							
	1	2	3	4	5	6	7	8
S_1	1,0	5,0	1,3	0,5	1,0	1,8	5,1	1,3
S_2	2,1	7,2	2,7	1,2	2,1	2,7	7,1	1,7
S_3	0,72	4,0	1,1	0,8	0,72	1,25	4,2	0,25
S_4	3,0	5,0	2,5	0,4	3,0	0,82	4,8	0,32
S_5	0,53	1,4	3,8	0,9	0,25	0,86	1,3	0,26

S ₆	0,25	2,3	1,7	1,7	0,8	0,7	3,7	0,7
S ₇	0,82	1,2	3,1	0,8	0,26	0,8	4,5	0,5
S ₈	0,63	2,3	1,2	1,5	0,45	1,4	4,2	1,2
S ₉	0,35	5,0	3,6	1,1	0,72	1,8	2,5	1,4
S ₁₀	0,74	3,6	2,5	1,9	0,84	1,57	2,0	0,57
S ₁₁	0,84	2,9	2,1	0,8	0,3	1,84	2,4	0,84
S ₁₂	0,4	1,6	1,8	0,46	0,84	1,78	2,9	0,78
S ₁₃	0,3	2,4	1,6	0,52	0,35	0,52	5,0	0,52
S ₁₄	0,62	4,7	2,3	0,78	0,82	0,86	2,5	1,4
S ₁₅	0,84	2,0	3,5	0,84	0,53	0,8	1,8	0,3
S ₁₆	0,5	3,3	3,7	0,57	0,25	1,9	2,8	1,9
S ₁₇	0,72	2,5	1,8	1,4	0,63	1,1	1,8	1,1
S ₁₈	0,6	1,8	1,5	1,2	0,74	1,5	3,3	1,5
S ₁₉	0,45	4,2	2,0	0,5	0,4	1,8	4,7	0,8
S ₂₀	0,36	2,8	2,3	0,7	0,62	1,7	1,6	1,7
S ₂₁	0,26	4,5	2,5	0,26	0,5	0,9	3,5	0,9
S ₂₂	0,32	1,8	1,8	0,32	0,6	1,2	2,3	0,4
S ₂₃	0,8	3,7	1,7	0,25	0,36	0,8	2,3	0,8
S ₂₄	0,5	2,5	1,6	1,7	0,32	1,2	1,2	1,2
S ₂₅	0,25	1,3	1,5	1,3	0,5	0,5	1,4	0,5
S ₂₆	3,2	7,5	10,0	7,0	6,7	34,5	7,3	27,3
S ₂₇	3,8	8,5	10,0	6,2	7,3	35,0	9,1	25,0

Примітки:

1. Навантаження (S_i) являє собою асинхронне навантаження, підключене безпосередньо до шин і-го вузла.

2. На шинах 5', 6', 7', 8' (схеми А і Б) умовно немає навантаження.

3.6. Параметри лінії

Лінія	Номер варіанта даних							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L1	60	30	65	20	36	47	41	80
L2	2,8	4	3	1,6	3,4	3,1	3,8	1,7
1-5	0,7	0,4	0,65	0,8	0,65	0,62	0,45	0,5
2-6	0,55	0,67	0,5	0,7	0,73	0,4	0,35	0,63
3-7	0,58	0,74	0,68	0,86	0,46	0,59	0,8	0,55
4-8	0,82	0,58	0,53	0,44	0,9	1,1	1,2	1,25
1-7	0,59	0,53	0,63	0,83	1,2	1,45	0,74	0,35

2–8	0,9	0,44	0,6	1,1	1,34	0,58	0,82	1,3
3–5	1,25	1,1	0,6	0,8	0,9	0,6	0,95	1,65
4–6	1,5	1,35	0,95	1,0	1,1	0,53	0,35	0,45
5–9	1,3	0,82	0,58	1,34	1,1	0,6	0,44	0,9
5–10	0,35	0,74	1,45	1,2	0,83	0,53	0,53	0,59
5–11	0,55	0,67	0,5	0,7	0,73	0,4	0,35	0,63
9–17	1,25	1,2	1,1	0,9	0,44	0,53	0,58	0,82
9–18	0,45	0,35	0,53	1,1	1,0	0,95	1,35	1,5
10–19	0,9	0,82	0,58	0,53	0,44	0,9	1,1	1,2
11–20	1,1	0,95	0,35	0,74	0,45	1,7	0,83	0,63
6–12	0,65	0,73	0,46	0,9	1,2	1,34	0,9	1,1
6–13	1,1	0,83	0,73	0,44	1,0	0,44	1,45	1,2
12–21	0,4	0,59	1,1	1,45	0,58	0,6	0,53	0,6
7–14	0,63	0,4	0,53	0,95	0,9	1,7	1,34	0,44
7–15	0,4	0,67	0,74	0,58	0,53	0,44	1,1	1,35
15–22	0,82	0,74	0,67	1,2	0,35	0,82	0,95	0,73
8–16	0,65	0,5	0,68	0,53	0,63	0,6	0,6	0,95
16–23	0,58	1,45	0,5	1,1	0,53	0,58	0,35	0,46
16–24	0,73	1,1	0,53	0,74	0,67	1,2	0,7	0,9
16–25	0,53	0,6	0,63	0,4	0,95	0,9	1,7	1,34
1–26	2,8	4,0	3,0	1,6	3,4	3,1	3,8	1,7
3–27	2,7	3,8	2,6	1,5	3,2	3,0	4,0	1,5

Примітки:

1.Лінії L1 і L2 – повітряні, інші – кабельні.

2.Довжина ліній задана у кілометрах.

3.7. Параметри реактора

Реактори		Номер варіанта даних							
		1	2	3	4	5	6	7	8
P1	U _н , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I _н , кА	0,4	2,0	2,0	1,0	0,4	1,0	2,0	0,4
	x _p , %	3,0	8,0	10,0	4,0	3,0	5,0	10,0	4,0
P2	U _н , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I _н , кА	0,4	2,0	2,0	1,0	0,4	1,0	1,0	0,4

	x_p , %	5,0	12,0	8,0	6,0	4,0	8,0	8,0	6,0
P3	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,4	2,5	2,0	1,0	0,4	1,5	1,5	0,4
	x_p , %	8,0	12,0	12,0	10,0	5,0	6,0	8,0	10,0
P4	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,6	0,75	1,5	0,75	0,4	0,75	1,5	0,3
	x_p , %	4,0	8,0	10,0	10,0	6,0	4,0	6,0	4,0
P5	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,3	1,0	0,6	0,75	0,4	0,75	1,5	0,3
	x_p , %	3,0	10,0	10,0	5,0	8,0	6,0	10,0	5,0
P6	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,6	1,0	2,5	1,5	0,4	0,75	1,0	0,8
	x_p , %	3,0	6,0	12,0	8,0	10,0	8,0	4,0	6,0

Продовження табл. В.7

P7	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,6	3,0	3,0	0,75	0,6	0,6	0,75	0,6
	x_p , %	5,0	12,0	12,0	3,0	3,0	8,0	10,0	6,0
P8	U_H , кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	I_H , кА	0,75	0,75	4,0	0,6	0,6	1,0	0,75	0,6
	x_p , %	4,0	5,0	12,0	6,0	4,0	8,0	6,0	5,0

	%								
P9	$U_H,$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	$I_H,$ кА	2x0,6	2x2,5	2x2,5	2x2,5	2x0,6	2x2,5	2x2,0	2x0,6
	$X_p,$ ОМ	0,68	0,85	0,5	0,61	1,44	0,41	0,72	1,01
	$X_{p0,5},$ ОМ	0,23	0,28	0,167	0,21	0,39	0,138	0,23	0,346
P10	$U_H,$ кВ	6,0	10,0	6,0	6,0	10,0	6,0	10,0	6,0
	$I_H,$ кА	2x0,6	2x2,5	2x2,5	2x2,5	2x0,6	2x2,5	2x2,0	2x0,6
	$X_p,$ ОМ	0,68	0,85	0,5	0,61	1,44	0,4	0,72	1,0
	$X_{p0,5},$ ОМ	0,29	0,22	0,167	0,21	0,39	0,138	0,23	0,346

Примітки:

1. P9 і P10 – здвоєні реактори.
2. X_p і $X_{p0,5}$ – індуктивний опір відповідного реактора при рівних й однаково направлених струмах в обох вітках і однієї вітки при відсутності струму в іншій.

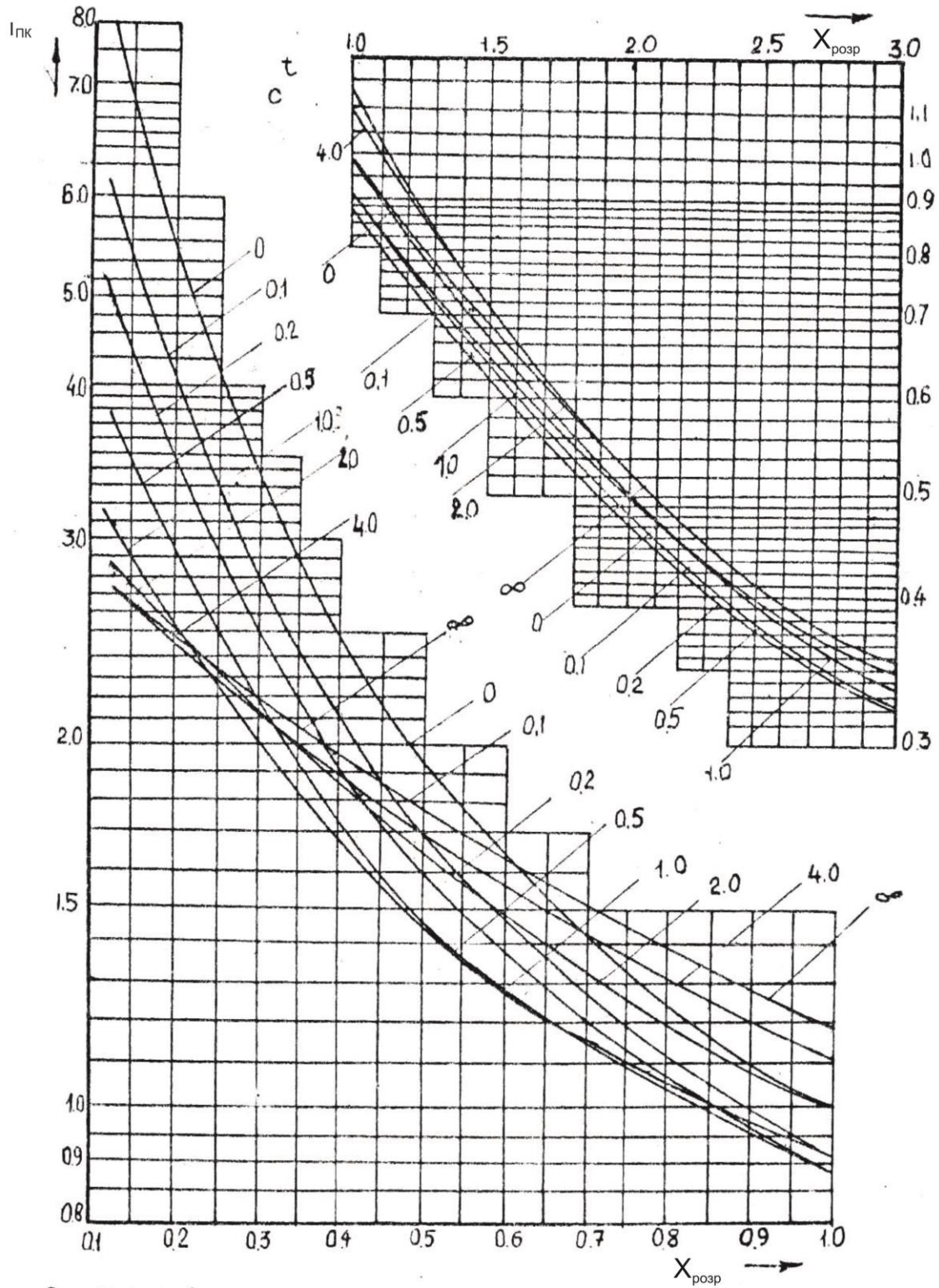


Рис.3.1. Розрахункові криві для турбогенераторів з АРЗ

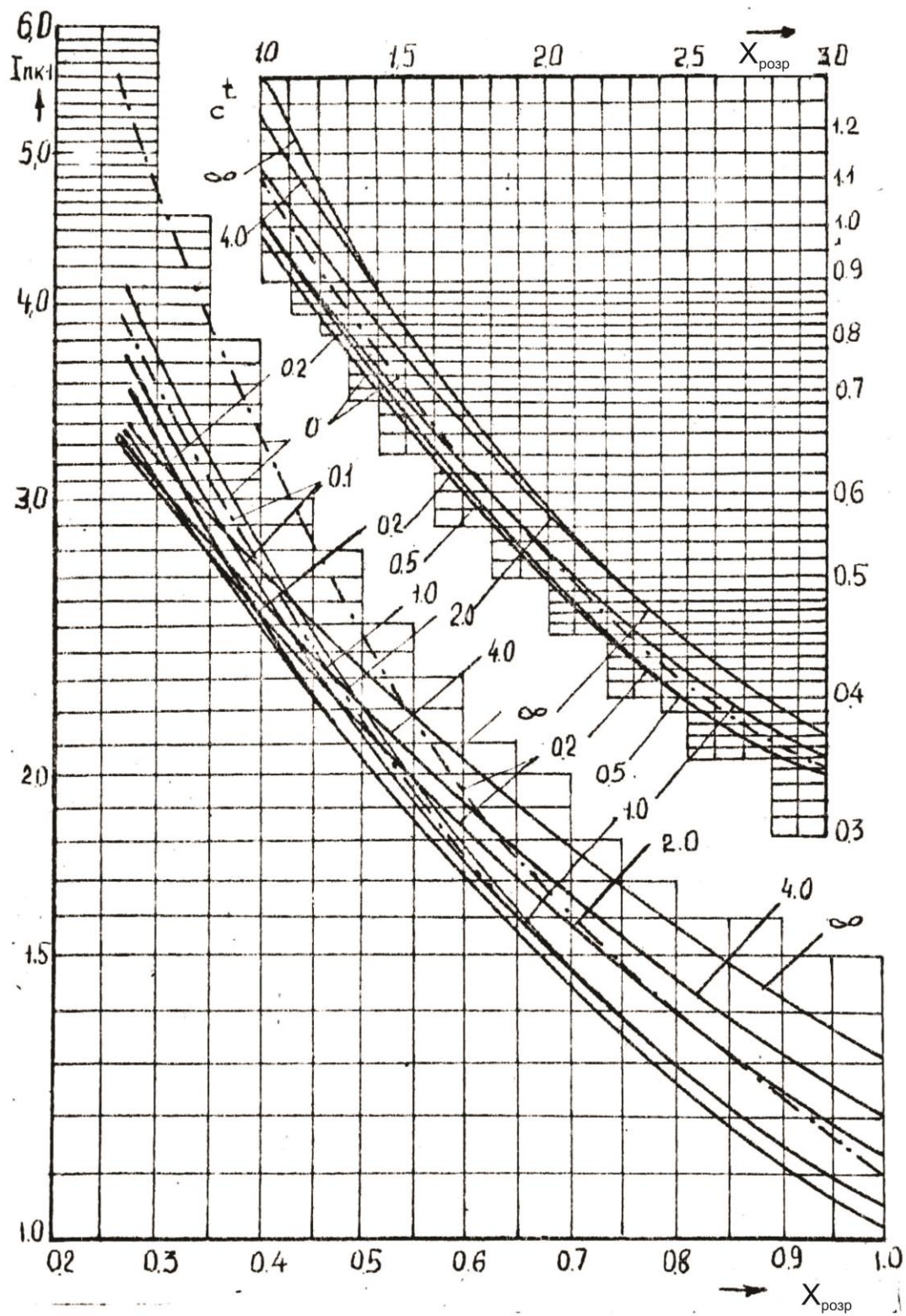


Рис. 3.2. Розрахункові криві для гідрогенератора з АРЗ

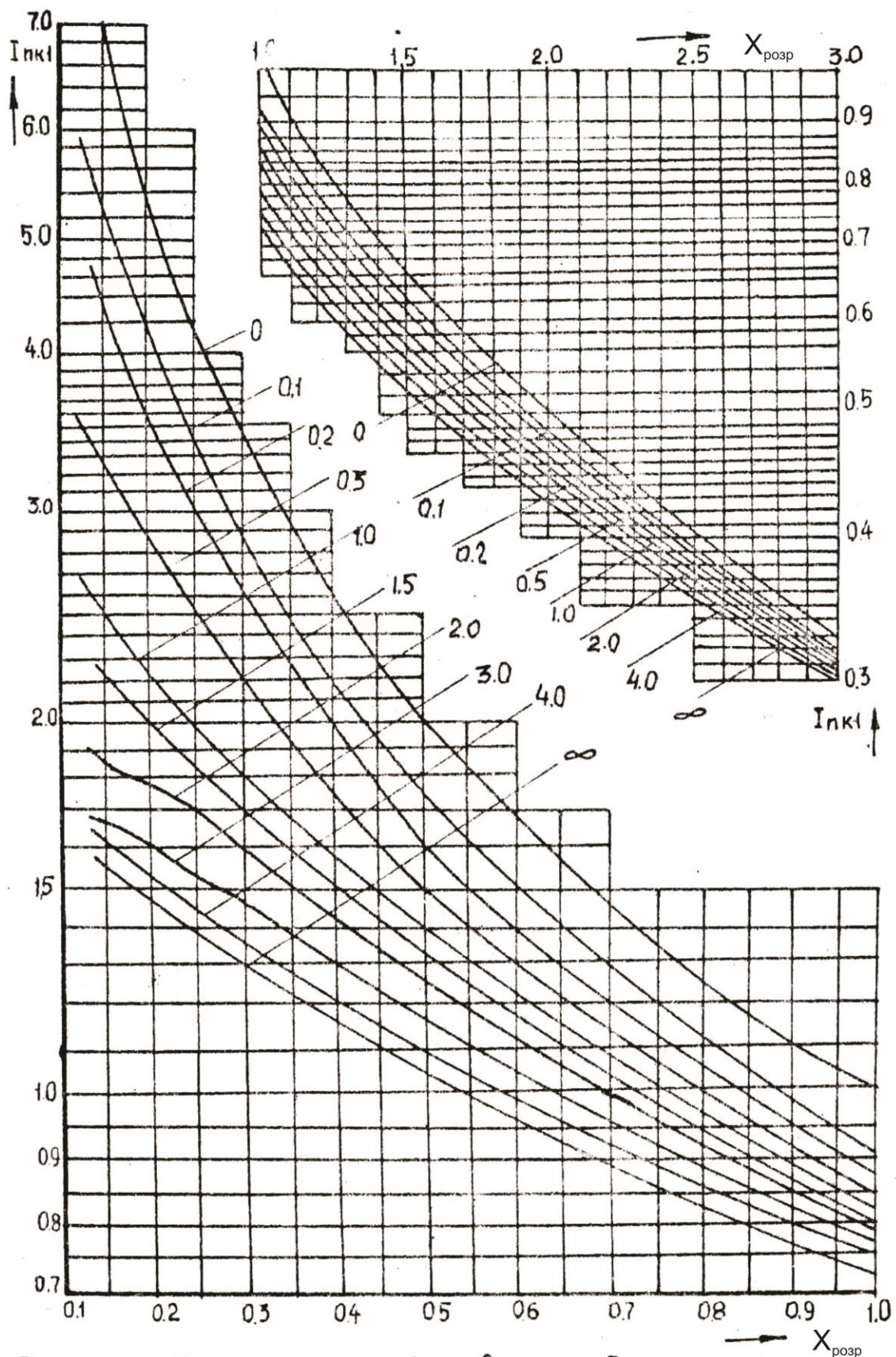


Рис. 3.3. Розрахункові криві для турбогенератора без АРЗ

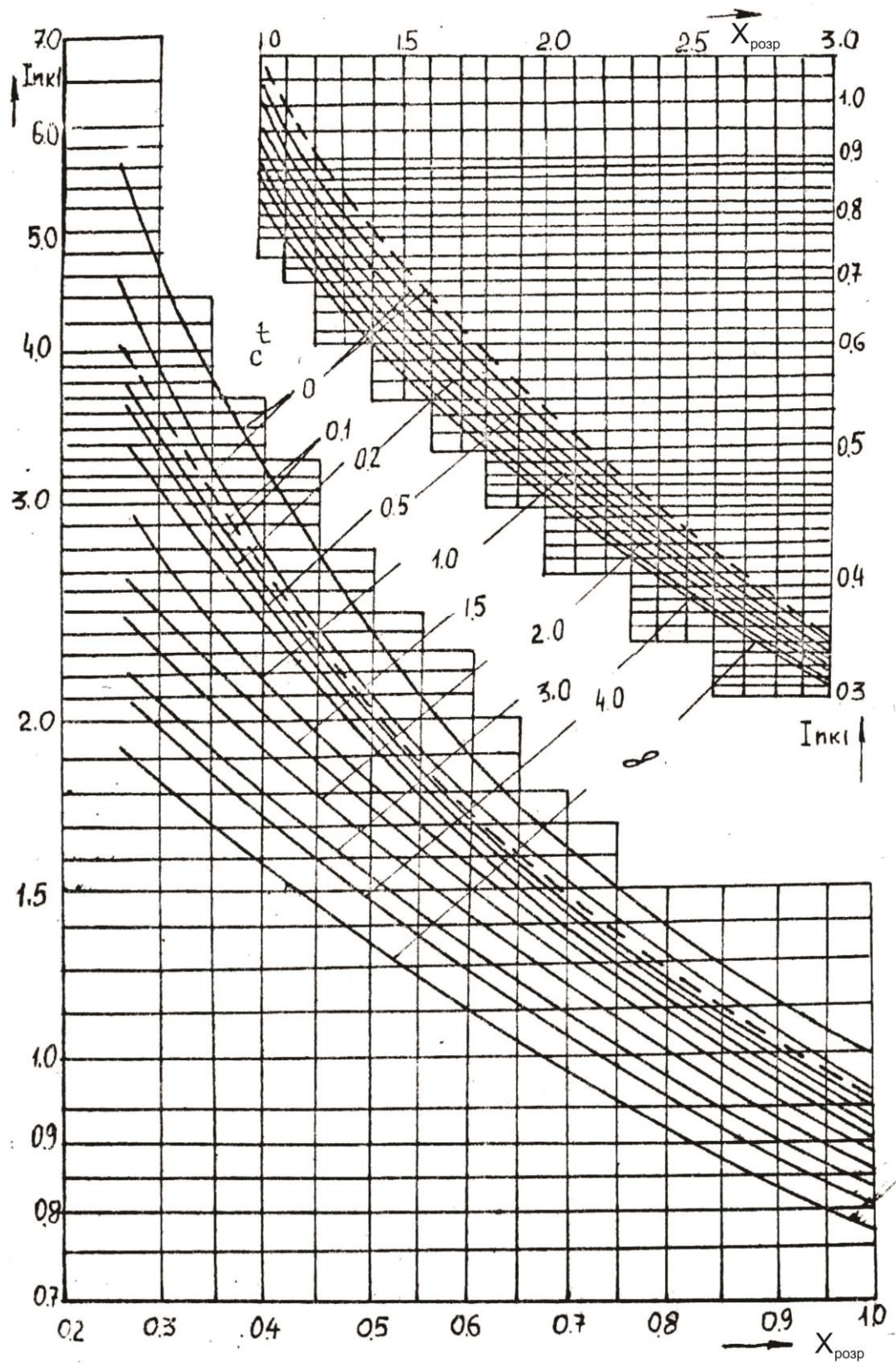


Рис. 3.4. Розрахункові криві для гідрогенераторів без АРЗ

РОЗДІЛ 4

Приклад оформлення 1

4.1. Розгляд вихідних даних проєкта

Вступ

Предмет вивчення зазначеної дисципліни – перехідні режими електроенергетичної системи в цілому і її підсистеми – системи електропостачання(СЕП). Це один з передбачених навчальним планом курсів, що дозволяє придбати навички, необхідні для кваліфікованого проектування й експлуатації СЕП.

Ціль вивчення дисципліни – формування знань в області електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у системах електропостачання й електроенергетичній системі в цілому.

Задачі дисципліни – з'ясування фізики досліджуваних явищ, придбання навичок і умінь розраховувати й експериментально досліджувати несталі режими зазначених систем.

Електроенергетична система є електромеханічною, тобто сукупністю механічних систем і електричних ланцюгів, у яких механічні і електричні процеси взаємозалежні і не можуть протікати незалежно друг від друга. Тому перехідні процеси характеризуються сукупністю електромагнітних і механічних змін в системі. Відповідно до них дійсний курс поділяється на дві частини.

У першій частині розглядаються електромагнітні перехідні процеси (процеси що відбуваються в режимі короткого замикання) а в другій – електромеханічні перехідні процеси (процеси пов'язані з явищем відносного руху роторів синхронних машин і стійкістю їхньої рівнобіжної роботи).

Вивчення дисципліни засноване на знанні курсів «Вища математика», «Теоретичні основи електротехніки», «Механіка», «Електричні мережі і системи», «Електричні станції і підстанції».

У свою чергу ця дисципліна необхідна для наступного вивчення спеціальних дисциплін «Релейний захист», «Електропостачання промислових підприємств» і т. д.

Значення дисципліни для роботи майбутніх фахівців-енергетиків на виробництві полягає і тім, що вона дозволяє визначати вимоги до різних елементів СЕП, підвищити їхню надійність і економічність, розробляти й удосконалювати нові методи керування процесами в СЕП.

Завдання на курсову роботу.

1. Варіанти до виконання курсової роботи

№	Сх.	Відключені елементи у нормальному режимі	Тип завдання параметрів системи	До 1кВ	Тип навантаження в мережі до 1 кВ	№ варіанта завдання параметрів	Час T1	Час T2	К ⁽¹⁾ ізол. нейтраль
16	Б	1,12,3,4,5,6,7,8	1	17	СМ	8	0.1	0.34	8

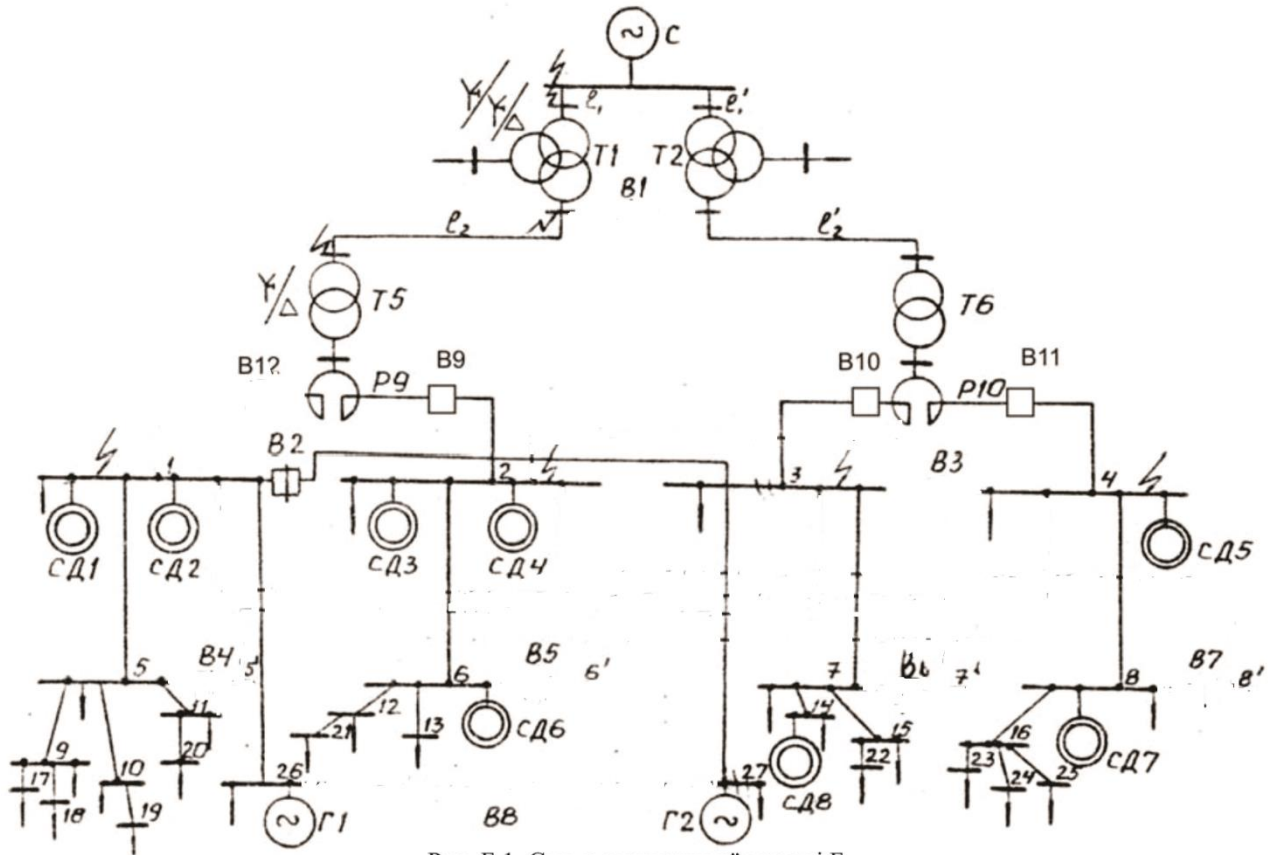


Рис. Б.1. Схема електричної мережі Б

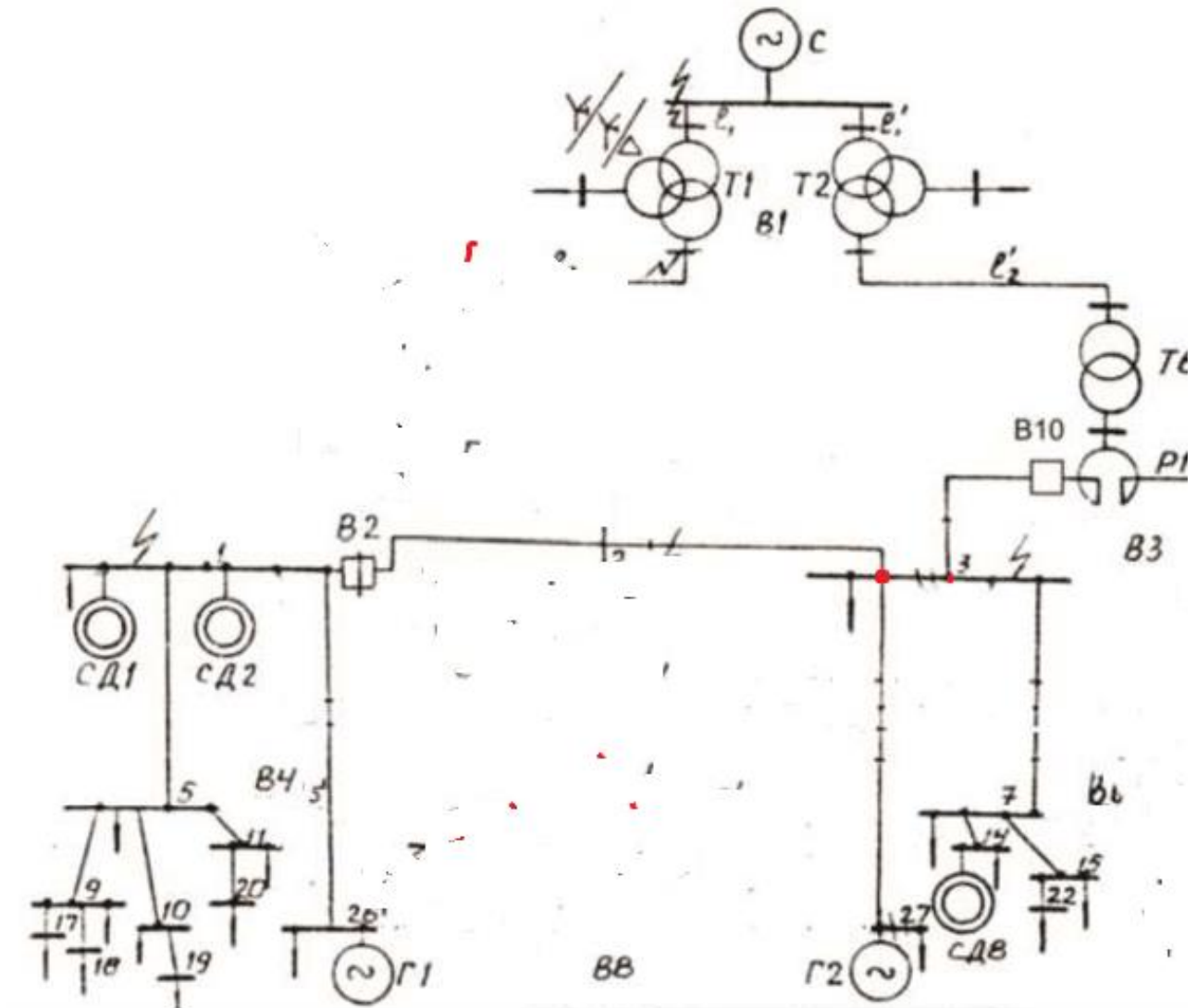


Рис.2. Розрахункова схема електричної мережі

Параметри системи

Спосіб задання системи:

Система задана як джерело нескінченної потужності

$$S_c = \infty$$

Примітки:

1. Реактивний опір системи задано в відносних одиницях та приведений до номінальних параметрів
2. При заданій системі I і II способами за базисну потужність прийняти номінальну потужність системи.

В.1. Параметри джерела системи

Спосіб задання системи		Номер варіанта даних	
		8	
I	$S_{Hист}$	320	
	x_c	0,25	

Примітки:

1. Реактивний опір системи задано в відносних одиницях та приведений до номінальних параметрів системи.

2. При заданій системі I і II способами за базисну потужність прийняти номінальну потужність системи.

В.2. Параметри генераторів

Генератори		Номер варіанта даних	
		8	
Г1,Г2	$P_H,$ МВт	25	
	$U_H,$ кВ	6,3	
	$\cos \varphi_H$	0,8	
	x_d''	12,9	

Примітки:

3. Опори генераторів наведені у відсотках і приведені до їх номінальних параметрів.

4. Генератори мають АРВ

В.3. Параметри трансформатора

Трансформатори				Номер варіанта даних	
				8	
T1	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$		25	ТДТН-25000/110; $U_{кВН}=17,5\%;$ $U_{кСН}=6,5\%;$ $U_{кВС}=10,5\%;$ $P_k=140\text{кВт}.$	
	$U_H,$ кВ	ВН	115		
		СН	38,5		
		НН	6,6		
T2	$S_H, \text{МВ} \cdot \text{А}$		25		
	$U_H,$	ВН	115		

	кВ	СН	38,5	ТД -10000/35; U _{кВН} =7.5%; P _к =65кВт.
		НН	6,6	
Т5	S _н , МВ·А		10	
	U _н , кВ	ВН	38,5	
		СН	–	
		НН	6,3	
Т6	S _н , МВ·А		10	
	U _н , кВ	ВН	38,5	
		СН	–	
		НН	6,3	

В.4. Параметри синхронних двигунів

Синхронні двигуни		Номер варіанта даних	
		8	
СД1	P _н , МВт	1,6	X _d ''*=0.2; E _q ''=1.1
	U _н , кВ	6,0	
СД2	P _н , МВт	1,0	
	U _н , кВ	6,0	
СД3	P _н , МВт	1,0	
	U _н , кВ	6,0	
СД4	P _н , МВт	1,25	
	U _н , кВ	6,0	
СД5	P _н , МВт	1,6	
	U _н , кВ	6,0	
СД6	P _н , МВт	1,25	
	U _н , кВ	6,0	
СД7	P _н	1,0	

	МВт		
	U _н , кВ	6,0	
СД8	P _н , МВт	1,0	
	U _н , кВ	6,0	

Примітки:

3. Синхронні двигуни СД1–СД5 мають АРВ.
4. Враховувати, що всі СД до КЗ працювали з повним номінальним навантаженням при номінальних коефіцієнтах потужності і напругах на затискачах.

В.5. Потужність навантажень

Навантаження, МВ·А	Номер варіанта даних	
	8	
S ₁		1,3
S ₂		1,7
S ₃		0,25
S ₄		0,32
S ₅		0,26
S ₆		0,7
S ₇		0,5
S ₈		1,2
S ₉		1,4
S ₁₀		0,57
S ₁₁		0,84
S ₁₂		0,78
S ₁₃		0,52
S ₁₄		1,4
S ₁₅		0,3
S ₁₆		1,9
S ₁₇		1,1
S ₁₈		1,5
S ₁₉		0,8
S ₂₀		1,7
S ₂₁		0,9
S ₂₂		0,4

S_{23}	0,8
S_{24}	1,2
S_{25}	0,5
S_{26}	27,3
S_{27}	25,0

Примітки:

1. Навантаження (S_i) являє собою асинхронне навантаження, підключене безпосередньо до шин i -го вузла.

2. На шинах 5', 6', 7', 8' (схеми А і Б) умовно немає навантаження.

В.6. Параметри лінії

Лінія	Номер варіанта даних	
	8	
L1	80	$I=132\text{A}$; $F=120\text{мм}^2 - 2*70\text{мм}^2$, $r_0=0,428\text{ Ом/км}$, $x_0=0,444\text{ Ом/км}$
L2	1,7	$I=165\text{A}$; $F=150\text{мм}^2 - 2*95\text{мм}^2$, $r_0=0,306\text{ Ом/км}$, $x_0=0,421\text{ Ом/км}$
1-5	0,5	$5+9+10+19+17+18+11+20=$ $0.26+1.4+0.57+0.8+1.1+1.5+0.84+1.7=8.17\text{МВА}$ $I=749\text{A}$; $F=470\text{мм}^2 - 2*240\text{мм}^2$, $r_0=0,121\text{ Ом/км}$, $x_0=0,405\text{ Ом/км}$
2-6	0,63	$6+13+12+21=0.7+0.52+0.78+0.9=2.9\text{МВА}$ $I=266\text{A}$; $F=166\text{мм}^2 - 2*95\text{мм}^2$, $r_0=0,326\text{ Ом/км}$, $x_0=0,078\text{ Ом/км}$
3-7	0,55	$7+14+15+22=0.5+1.4+0.3+0.4=2.69\text{МВА}$ $I=247\text{A}$; $F=154\text{мм}^2 - 2*95\text{мм}^2$, $r_0=0,326\text{ Ом/км}$, $x_0=0,078\text{ Ом/км}$
4-8	1,25	$8+16+23+24+25=1.2+1.9+0.8+1.2+0.5=5.6\text{МВА}$ $I=514\text{A}$; $F=322\text{мм}^2 - 2*185\text{мм}^2$, $r_0=0,167\text{ Ом/км}$, $x_0=0,073\text{ Ом/км}$
5-9	0,9	$9+17+18=1.4+1.1+1.5=3\text{МВА}$ $I=275\text{A}$; $F=172\text{мм}^2 - 2*95\text{мм}^2$, $r_0=0,326\text{ Ом/км}$, $x_0=0,078\text{ Ом/км}$
5-10	0,59	$10+19=0.57+0.8=1.37\text{МВА}$ $I=126\text{A}$; $F=79\text{мм}^2 - 2*50\text{мм}^2$, $r_0=0,62\text{ Ом/км}$, $x_0=0,083\text{ Ом/км}$

5-11	0,63	11+20=0.84+1.7=2.54MBA I=233A; F=146MM ² - 2*95MM ² ,r0=0,326 Ом/км, x0=0,078Ом/км
9-17	0,82	1.1MBA I=101A; F=63MM ² - 2*35MM ² ,r0=0,89Ом/км, x0=0,087Ом/км
9-18	1,5	1.5MBA I=138A; F=86.5MM ² -2*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
10-19	1,2	0.8MBA I=73.3A; F=45.8MM ² -1*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
11-20	0,63	1.75MBA I=155.8A; F=97.4MM ² -2*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
6-12	1,1	12+21=0.78+0.9=1.68MBA I=154A; F=96MM ² -2*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
6-13	1,2	0.52MBA I=47.65A; F=30MM ² -1*35MM ² , r0=0,89Ом/км, x0=0,087Ом/км
12-21	0,6	0.9MBA I=82.5A; F=52MM ² -2*35MM ² , r0=0,89Ом/км, x0=0,087Ом/км
7-14	0,44	1.4MBA I=128A; F=80.2MM ² -2*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
7-15	1,35	15+22=0.3+0.4=0.7MBA I=64.2A; F=40.1MM ² -1*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
15-22	0,73	0.4MBA I=37A; F=23MM ² -1*25MM ² , r0=1.24Ом/км, x0=0,091Ом/км
8-16	0,95	16+23+24+25=1.9+0.8+1.2+0.5=4.4MBA I=503.3A; F=252MM ² - 2*150MM ² ,r0=0,206Ом/км, x0=0,074Ом/км
16-23	0,46	0.8MBA I=73.3A; F=45.8MM ² -1*50MM ² , ,r0=0,62 Ом/км, x0=0,083Ом/км
16-24	0,9	1.2MBA I=110A; F=68.7MM ² - 2*35MM ² ,r0=0,89Ом/км,

		$x_0=0,087\text{Ом/км}$
16–25	1,34	0.5MVA $I=45.8\text{A}; F=29\text{мм}^2-1*35\text{мм}^2, r_0=0,89\text{Ом/км},$ $x_0=0,087\text{Ом/км}$
1–26	1,7	27.3MVA $I=2502\text{A}; F=1564\text{мм}^2- 7*240\text{мм}^2, r_0=0,121\text{ Ом/км},$ $x_0=0,405\text{Ом/км}$
3–27	1,5	25MVA $I=2292\text{A}; F=1432\text{мм}^2- 6*240\text{мм}^2, r_0=0,121\text{ Ом/км},$ $x_0=0,405\text{Ом/км}$
1–7	0,35	-
2–8	1,3	-
3–5	1,65	-
4–6	0,45	-

Примітки:

1. Лінії L1 і L2 – повітряні, інші – кабельні.

2. Довжина ліній задана у кілометрах

В.7. Параметри реактора

Реактори		Номер варіанта даних
		8
P9	$U_H,$ кВ	6,0
	$I_H,$ кА	2x0,6
	$X_p,$ Ом	1,01
	$X_{p0,5},$ Ом	0,346
P10	$U_H,$ кВ	6,0
	$I_H,$ кА	2x0,6
	$X_p,$ Ом	1,0
	$X_{p0,5},$ Ом	0,346

Примітки:

3. P9 і P10 – здвоєні реактори.

4. X_p і $P_{p0,5}$ – індуктивний опір відповідного реактора при рівних й однаконо направлених струмах в обох вітках і однієї вітки при відсутності струму в іншій.

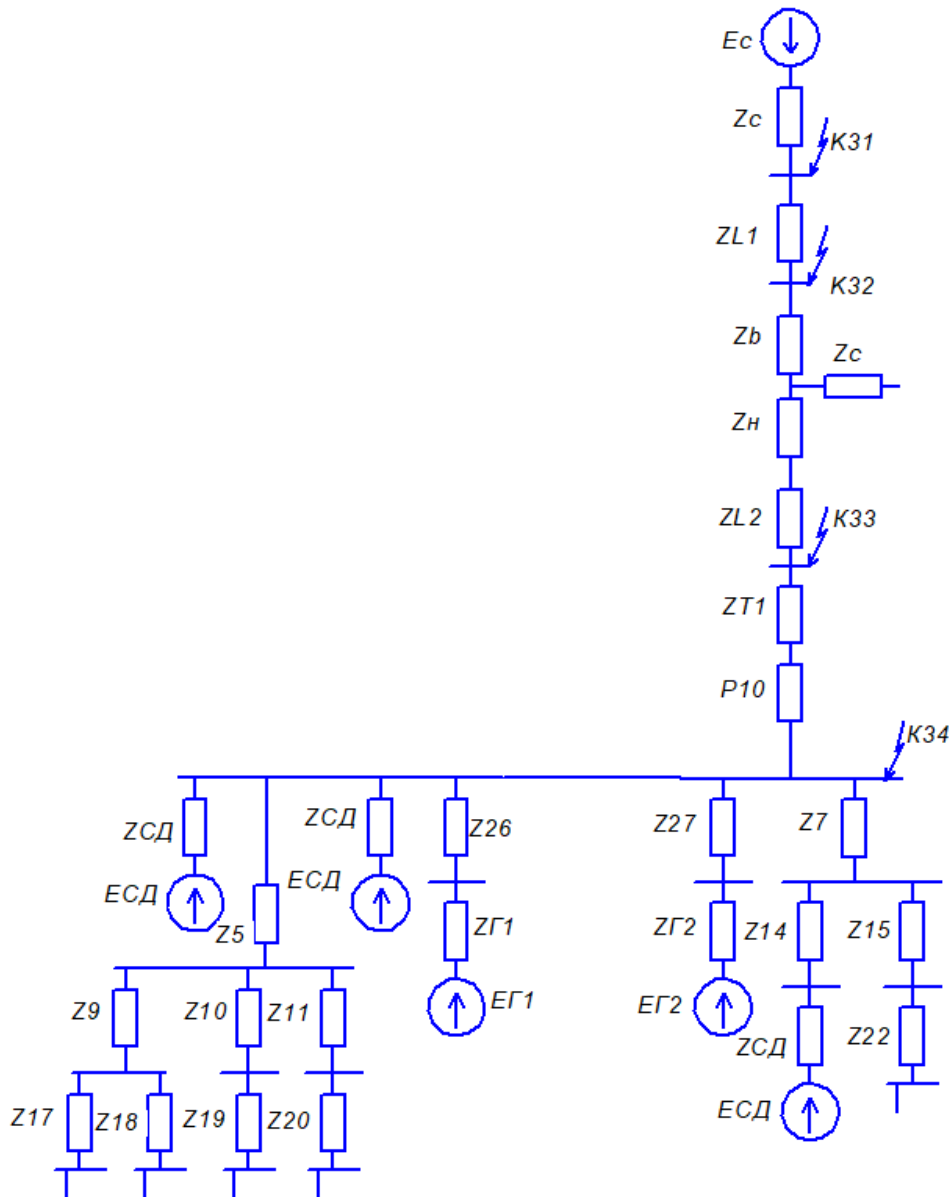


Рис. 3. Схема заміщення

4.2. Розрахунок точок короткого замикання

Розрахунок першої точки КЗ

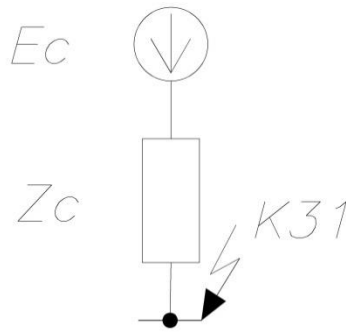


Рис. 4. Схема заміщення першої точки КЗ

$$X_{GS} = X_C^* \cdot \frac{U_{\text{ср.осн}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,25 \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 10.33 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{П1}}^{(3)} = \frac{E_{GS}}{\sqrt{3} \cdot X_{GS}} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10.33} = 6427.4 \text{ A} = 6.43 \text{ кА}$$

$$K_y = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3}{(x_1/r_1)}} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3}{\left(\frac{10.33}{0}\right)}} = 2$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П1}}^{(3)} \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 6.43 \cdot 2 = 18.2 \text{ кА}$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{\text{П2}}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 6.43 = 1.28 \text{ МВА}$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot \sqrt{3} \cdot i_{\text{уд}} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 18.2 = 3.63 \text{ МВА}$$

Розрахунок в відносних одиницях

$$E_{GS}^* = \frac{E_{GS}}{U_{\text{ср.осн}}} = \frac{115 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} = 1 \text{ в. о}$$

$$Z_{GS}^* = X_C^* \cdot \frac{S_b}{S_{\text{НОМ}}} = 0,25 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{320 \cdot 10^6} = 0,25 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{П1}}^* = \frac{E_{GS}^*}{Z_{GS}^*} = \frac{1}{0.25} = 4 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 1.61 \text{ кА}$$

$$I_{\text{П1}}^{(3)} = I_b \cdot I_{\text{П1}}^* = 1.61 \cdot 4 = 6.44 \text{ кА}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П1}}^{(3)} \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 6.44 \cdot 2 = 18.21 \text{ кА}$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{\text{П2}}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 6.44 = 1.28 \text{ МВА}$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot \sqrt{3} \cdot i_{\text{уд}} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 18.2 = 3.63 \text{ МВА}$$

Розрахунок другої точки КЗ в іменованих одиницях

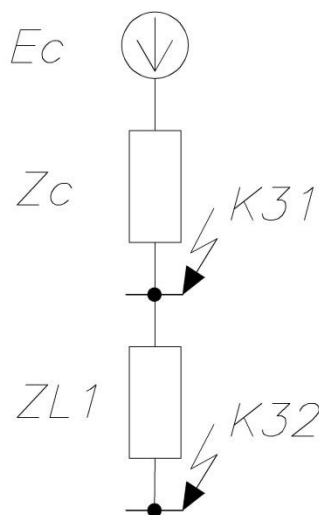


Рис. 5 Схема заміщення другої точки КЗ

$$X_{GS} = X_C^* \cdot \frac{U_{\text{ср.очн}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,25 \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 10.330 \text{ Ом}$$

$$X_{L1} = X_0 \cdot l \left(\frac{U_{\text{ср.очн}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 17.76 \text{ Ом}$$

$$r_{L1} = r_0 \cdot l \left(\frac{U_{\text{ср.очн}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 17.12 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{П2}}^{(3)} = \frac{E_{GS}}{\sqrt{3} \cdot (X_{GS}i + r_{L1} + X_{L1}i)} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (17.2 + j17.76 + 10.33i)}$$

$$= 1054.46 - 1719.7i = 2017.23 \cdot e^{-j58.5} \text{ A}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П2}}^{(3)} \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 2017.23 \cdot e^{-j58.5} \cdot 1.18 = 3366.3 \cdot e^{-j58.5} \text{ A}$$

$$K_{\text{уд}} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 1719.7}{1054.5}} = 1.18$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{\text{П2}}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 115 \cdot 10^3 \cdot 2017.23 \cdot \sqrt{3} = 401.8 \text{ кВА}$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot \sqrt{3} \cdot i_{\text{уд}} = 115 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 3366.3 = 670.5 \text{ кВА}$$

Розрахунок в відносних одиницях

$$E_{GS}^* = \frac{E_{GS}}{U_{\text{ср.очн}}} = \frac{115 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} = 1 \text{ в. о.}$$

$$Z_{GS}^* = X_C^* \cdot \frac{S_b}{S_{\text{НОМ}}} = 0,25 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{320 \cdot 10^6} = 0,25 \text{ Ом}$$

$$X_{L1}^* = X_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.4297 \text{ в. о.}$$

$$r_{L1}^* = r_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.414 \text{ в. о.}$$

$$I_{\Pi 2}^* = \frac{E_{GS}^*}{(X_{GS}i + r_{L1} + X_{L1}i)} = \frac{1}{(0.414 + 0.25i + 0.4297i)} = 0.654 - 1.073i \text{ в. о.}$$

$$I_b = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6.i}} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 1606.54 \text{ A}$$

$$I_{\Pi 2} = I_{\Pi 2}^* \cdot I_b = 0.654 - 1.073i \cdot 1606.54 = 1050.7 - 1723.8i$$

$$= 2018.8 \cdot e^{-58.63} \text{ A}$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi 2}^{(3)} \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 2018.8 \cdot e^{-58.63} \cdot 1.18 = 3367.58 \cdot e^{-58.63} \text{ A}$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{\Pi 2}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 115 \cdot 10^3 \cdot 2018.8 \cdot \sqrt{3} = 402.1 \text{ кВА}$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot \sqrt{3} \cdot i_{уд} = 115 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 3367.58 = 670.8 \text{ кВА}$$

Розрахунок третьої точки КЗ в іменованих одиницях

Для розрахунку у відносних одиницях приймаємо наступні значення:
 $S_6 = 320 \cdot 10^6 \text{ МВА}; U_{6.158} = 115 \cdot 10^3 \text{ кВ}; U_{6.37} = 37 \cdot 10^3 \text{ кВ}; U_{6.6.3}$
 $= 6.3 \cdot 10^3 \text{ кВ}$

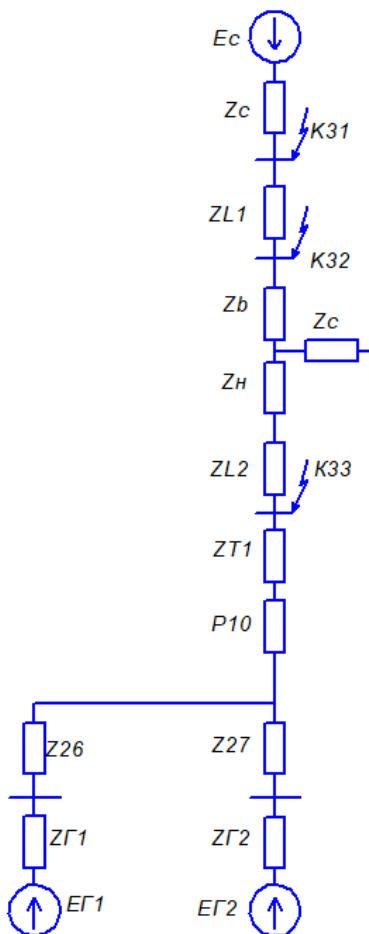


Рис. 7. Схема заміщення четвертої точки КЗ

$$X_{GS} = X_C^* \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOM}} = 0,25 \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 1.069 \text{ Ом}$$

$$X_{L1} = X_0 \cdot l \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.838 \text{ Ом}$$

$$r_{L1} = r_0 \cdot l \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.77 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2B} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kBH} + U_{kBC} - U_{kCH}) \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (17.5 + 10.5 - 6.5) \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 5.887 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2C} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kCH} + U_{kBC} - U_{kBH}) \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (6.5 + 10.5 - 17.5) \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = -0.137 = 0 \text{ Ом}$$

$$r_{T2} = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{HOMT2}} \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0.153 \text{ Ом}$$

$$X_{L2} = X_0 \cdot l_2 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.421/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{37 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.358 \text{ Ом}$$

$$r_{L2} = r_0 \cdot l_2 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.306/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{37 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.26 \text{ Ом}$$

$$X_B = \sqrt{Z_{T2B}^2 - \left(\frac{r_{T2}}{2} \right)^2} = \sqrt{5.887^2 - \left(\frac{0.153}{2} \right)^2} = 5,88 \text{ Ом}$$

$$X_C = \sqrt{Z_{T2c}^2 - \left(\frac{r_{T2}}{2} \right)^2} = \sqrt{0 - \left(\frac{0.166}{2} \right)^2} = 0 \text{ Ом}$$

$$Z_{ekb} = X_{GS}i + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{Xb} + Z_{Xc}$$

$$= 1.069i + (1.77 + 1.838i) + (0.26 + 0.358i)$$

$$+ (0.153 + 5,887i) + (0.153 + 0i) = 2.306 + 9.152i \text{ Ом}$$

$$Z_{T4} = \frac{U_{kBH-HH} \cdot U_{cp.6,3}^2}{100 \cdot S_{HOMT4}} = \frac{7.5 \cdot (37 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 10.27 \text{ Ом}$$

$$r_{T4} = \frac{\Delta P}{S_{HOMT4}} \cdot \frac{U_{cp.6.3}^2}{S_{HOMT4}} = \frac{65000}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 0.026 \text{ Ом}$$

$$X_{T4} = \sqrt{Z_{T4B}^2 - r_{T4B}^2} = 10.26 \text{ Ом}$$

$$X_{L3} = X_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{U_{\text{cp.och}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.071/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.612 \text{ Ом}$$

$$r_{L3-27} = r_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{U_{\text{cp.och}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.121/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.043 \text{ Ом}$$

$$X_{GS\Gamma 2} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{cp.6,3}}^2}{S_{\text{НОМТ4}}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 5.65 \text{ Ом}$$

$$X_{L3} = X_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{U_{\text{cp.och}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.071/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.595 \text{ Ом}$$

$$r_{L3-27} = r_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{U_{\text{cp.och}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.121/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 1.014 \text{ Ом}$$

$$X_{GS\Gamma 2} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{cp.6,3}}^2}{S_{\text{НОМТ4}}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 5.65 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{рєН}} = \frac{Z_{L3-27} \cdot Z_{L1-26}}{Z_{L3-27} + Z_{L1-26}} = \frac{1.014 + 6.24i \cdot 1.043 + 6.26i}{1.014 + 6.24i + 1.043 + 6.26i} = 0.517 + 3.13i$$

$$Z_{\text{єкб2}} = Z_{\text{рєН}} + Z_{\text{T4}} = (0.517 + 3.13i) + (0.026 + 10.26i) = 0.543 + 13.39i \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{пєз}} = \frac{Z_{\text{єкб1}} \cdot Z_{\text{єкб2}}}{Z_{\text{єкб1}} + Z_{\text{єкб2}}} = \frac{2.306 + 9.152i \cdot 0.543 + 13.39i}{2.306 + 9.152i + 0.543 + 13.39i} = 0.896 + 5.49i \text{ Ом}$$

$$E_{\text{пєз}} = Z_{\text{пєз}} \cdot \left(1 \cdot \frac{37000}{Z_{\text{єкб2}}} + \frac{E_{\text{GS}}}{Z_{\text{єкб1}}} \right)$$

$$= 0.896 + 5.49i \cdot \left(1 \cdot \frac{37000}{0.543 + 13.39i} + \frac{39960}{2.306 + 9.152i} \right)$$

$$= 38576.4 + 140.8i = 38710.8 e^{0.2B}$$

$$I_{\text{П4}}^{(3)} = \frac{E_{\text{пєз}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{пєз}}} = \frac{38710.8}{\sqrt{3} \cdot 0.896 + 5.49i} = 647.13 - 3969.16i = 4021.9 \cdot e^{-81} \text{ A}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П4}}^{(3)} \cdot K_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 4021.9 \cdot e^{-81} \cdot 1.62 = 9214.1 e^{-81} \text{ A}$$

$$K_{\text{уд}} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 4021.9}{647.13}} = 1.62$$

$$S_{\text{kzmin}} = E_{\text{GS}} \cdot I_{\text{П4}}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 37 \cdot 4021.9 \cdot \sqrt{3} = 257.7 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{kzmax}} = E_{\text{GS}} \cdot I_{\text{П4}}^{(3)} \cdot i_{\text{уд}} = 37 \cdot \sqrt{3} \cdot 9214.1 = 590.5 \text{ кВА}$$

Розрахунок у відносних одиницях

$$E_{\text{GS}}^* = \frac{E_{\text{GS}}}{U_{\text{cp.och}}} = \frac{37 \cdot 10^3}{37 \cdot 10^3} = 1 \text{ в. о}$$

$$Z_{GS}^* = X_C^* \cdot \frac{S_b}{S_{HOM}} = 0,25 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{320 \cdot 10^6} = 0,25 \text{ OM}$$

$$X_{L1}^* = X_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0,444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0,4297 \text{ B. O.}$$

$$r_{L1}^* = r_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0,428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0,414 \text{ B. O.}$$

$$Z_{T2B}^* = \frac{0,5}{100} \cdot (U_{kBH} + U_{kBC} - U_{kCH}) \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0,5}{100} \cdot (17,5 + 10,5 - 6,5) \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 1,376$$

$$Z_{T2C}^* = \frac{0,5}{100} \cdot (U_{kCH} + U_{kBC} - U_{kBH}) \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0,5}{100} \cdot (6,5 + 10,5 - 17,5) \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = -0,032 = 0 \text{ OM}$$

$$r_{T2}^* = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{HOMT2}} \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0,0358 \text{ OM}$$

$$X_{L2}^* = X_0 \cdot l_2 \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0,421/2 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(37 \cdot 10^3)^2} \right) = 0,084 \text{ B. O.}$$

$$r_{L2}^* = r_0 \cdot l_2 \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0,306/2 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(37 \cdot 10^3)^2} \right) = 0,061 \text{ B. O.}$$

$$X_B^* = \sqrt{Z_{T2B}^{*2} - \left(\frac{r_{T2}^*}{2} \right)^2} = \sqrt{1,376^2 - \left(\frac{0,0358}{2} \right)^2} = 1,376 \text{ B. O.}$$

$$X_C^* = \sqrt{Z_{T2C}^{*2} - \left(\frac{r_{T2}^*}{2} \right)^2} = \sqrt{0 - \left(\frac{0,0358}{2} \right)^2} = 0 \text{ B. O.}$$

$$Z_{ekb1}^* = X_{GS}^* i + Z_{L1}^* + Z_{L2}^* + Z_{XB}^* + Z_{XC}^* =$$

$$= 0,25i + (0,414 + 0,4297i) + (0,061 + 0,084i)$$

$$+ (0,0358 + 1,376i) + (0,0358 + 0i) = 0,55 + 2,14i \text{ B. O.}$$

$$Z_{T4B}^* = \frac{U_{kBH-HH} \cdot S_6}{100 \cdot S_{HOMT4}} = \frac{7,5 \cdot 320 \cdot 10^6}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 2,4 \text{ B. O.}$$

$$r_{T4B}^* = \frac{\Delta P}{S_{HOMT4}} \cdot \frac{S_6}{S_{HOMT4}} = \frac{65000}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 0,208 \text{ B. O.}$$

$$X_{T4B}^* = \sqrt{Z_{T4B}^{*2} - r_{T4B}^{*2}} = 2,39 \text{ B. O.}$$

$$X_{L3-27}^* = X_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.071/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.143 \text{ В. о.}$$

$$r_{L3-27}^* = r_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.121/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.244 \text{ В. о.}$$

$$X_{GS\Gamma 2}^* = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOM\Gamma 2}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 1.32 \text{ В. о.}$$

$$X_{L1-26}^* = X_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.071/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.139 \text{ В. о.}$$

$$r_{L1-26}^* = r_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{S_6}{U_{6.i}^2} \right) = 0.121/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.236 \text{ В. о.}$$

$$X_{GS\Gamma 1}^* = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOM\Gamma 1}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 1.32 \text{ В. о.}$$

$$Z_{\text{ГЕН}} = \frac{Z_{L3-27} \cdot Z_{L1-26}}{Z_{L3-27} + Z_{L1-26}} = \frac{0.244 + 1.463i \cdot 0.236 + 1.459i}{0.244 + 1.463i + 0.236 + 1.459i} = 0.12 + 0.73i \text{ В. о.}$$

$$Z_{\text{ekb2}}^* = Z_{\text{ГЕН}} + Z_{\text{XT4b}}^* = 0.12 + 0.73i + 0.208 + 2.39i = 0.328 + 3.12i \text{ В. о.}$$

$$Z_{\text{pez}}^* = \frac{Z_{\text{ekb1}}^* \cdot Z_{\text{ekb2}}^*}{Z_{\text{ekb1}}^* + Z_{\text{ekb2}}^*} = \frac{0.55 + 2.14i \cdot 0.328 + 3.12i}{0.55 + 2.14i + 0.328 + 3.12i} = 0.32 + 1.481i \text{ В. о.}$$

$$E_{\text{pez}}^* = Z_{\text{pez}}^* \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{Z_{\text{ekb2}}^*} + \frac{E_{GS}^*}{Z_{\text{ekb1}}^*} \right)$$

$$= 0.32 + 1.481i \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{0.328 + 3.12i} + \frac{1.08}{0.55 + 2.14i} \right)$$

$$= 1.22 - 0.023i \text{ В. о.}$$

$$I_{\Pi 4}^* = \frac{E_{\text{pez}}^*}{Z_{\text{pez}}^*} = \frac{1.22 - 0.023i}{0.32 + 1.481i} = 0.155 - 0.79i \text{ В. о.}$$

$$I_b = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6.i}} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 37 \cdot 10^3} = 4993.2996 \text{ A}$$

$$I_{\Pi 2} = I_{\Pi 2}^* \cdot I_b = 0.155 - 0.79i \cdot 4993.2996 = 773.96 - 3944.7i$$

$$= 4019.9 \cdot e^{-81} \text{ A}$$

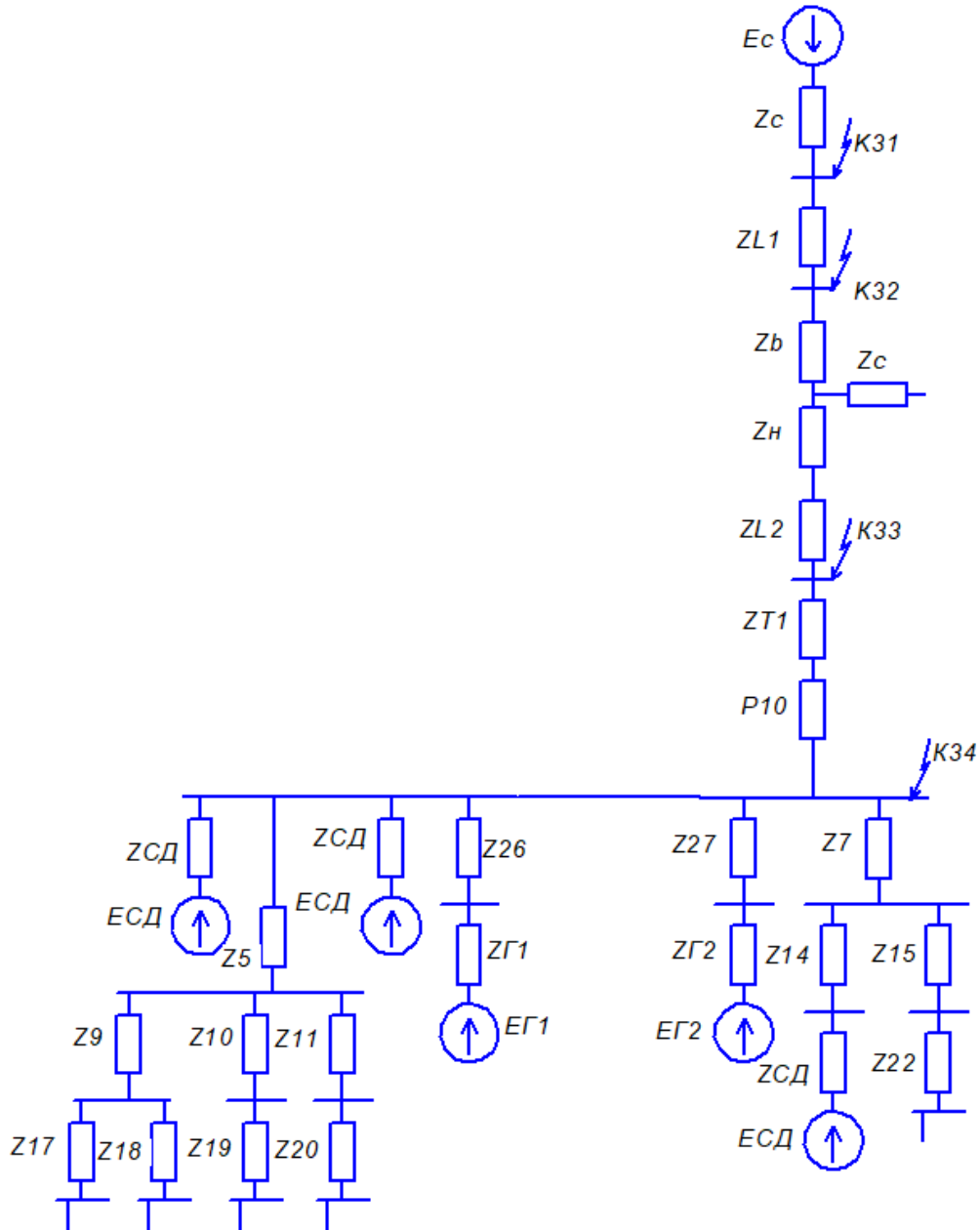
$$i_{y\text{д}} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi 4}^{(3)} \cdot K_{y\text{д}} = \sqrt{2} \cdot 4019.9 \cdot e^{-81} \cdot 1.62 = 9209.6 e^{-81} \text{ A}$$

$$K_{y\text{д}} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 3944.7}{773.96}} = 1.62$$

$$S_{kz\text{min}} = E_{GS} \cdot I_{\Pi 4}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 37 \cdot 4019.9 \cdot \sqrt{3} = 257.6 \text{ кВА}$$

$$S_{kz\text{max}} = E_{GS} \cdot I_{\Pi 4}^{(3)} \cdot i_{y\text{д}} = 37 \cdot \sqrt{3} \cdot 9209.6 = 590.2 \text{ кВА}$$

Розрахунок четвертої точки КЗ в іменованих одиницях



$$X_{GS} = X_C^* \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{НОМ}} = 0,25 \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{320 \cdot 10^6} = 0,031 \text{ Ом}$$

$$X_{L1} = X_0 \cdot l \left(\frac{U_{cp.очн}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0,444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,053 \text{ Ом}$$

$$r_{L1} = r_0 \cdot l \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0514 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2B} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kBH} + U_{kBC} - U_{kCH}) \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (17.5 + 10.5 - 6.5) \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0.17 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2C} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kCH} + U_{kBC} - U_{kBH}) \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (6.5 + 10.5 - 17.5) \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = -0.00159 = 0 \text{ Ом}$$

$$r_{T2} = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{HOMT2}} \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{HOMT2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0.0045 \text{ Ом}$$

$$X_{L2} = X_0 \cdot l_2 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.421/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{37 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.01 \text{ Ом}$$

$$r_{L2} = r_0 \cdot l_2 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.306/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{37 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0075 \text{ Ом}$$

$$X_B = \sqrt{Z_{T2B}^2 - \left(\frac{r_{T2}}{2} \right)^2} = \sqrt{0.17^2 - \left(\frac{0.0045}{2} \right)^2} = 0,17 \text{ Ом}$$

$$X_c = \sqrt{Z_{T2c}^2 - \left(\frac{r_{T2}}{2} \right)^2} = \sqrt{0 - \left(\frac{0.0045}{2} \right)^2} = 0 \text{ Ом}$$

$$Z_{T4} = \frac{U_{kBH-HH} \cdot U_{cp.6,3}^2}{100 \cdot S_{HOMT4}} = \frac{7.5 \cdot (6.3 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 0.298 \text{ Ом}$$

$$r_{T4} = \frac{\Delta P}{S_{HOMT4}} \cdot \frac{U_{cp.6,3}^2}{S_{HOMT4}} = \frac{65000}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 0.026 \text{ Ом}$$

$$X_{T4} = \sqrt{Z_{T4B}^2 - r_{T4B}^2} = 0.297 \text{ Ом}$$

$$Z_{ekb} = X_{GS}i + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{Xb} + Z_{Xc} + Z_{T4}$$

$$= 0.031i + (0.0514 + 0.053i) + (0.0075 + 0.01i)$$

$$+ (0.0045 + 0,17i) + (0.0045 + 0i) + (0.026 + 0.297i)$$

$$= 0.094 + 0.561i \text{ Ом}$$

$$X_{L3} = X_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.071/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0178 \text{ Ом}$$

$$r_{L3-27} = r_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.121/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.03 \text{ Ом}$$

$$X_{GS\Gamma 2} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{cp.6,3}}^2}{S_{HOM\Gamma 2}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 0.164 \text{ Ом}$$

$$X_{L1-26} = X_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.071/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.017 \text{ Ом}$$

$$r_{L3-27} = r_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.121/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0294 \text{ Ом}$$

$$X_{GS\Gamma 1} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{cp.6,3}}^2}{S_{HOM\Gamma 1}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 0.164 \text{ Ом}$$

$$Z_{L1-26} = X_{GS\Gamma 1} + r_{L1-25} + X_{L1-26} = 0.0294 + 0.181i \text{ Ом}$$

$$Z_{L3-27} = X_{GS\Gamma 1} + r_{L3-27} + X_{L3-27} = 0.03 + 0.182i \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{гех}} = \frac{Z_{L3-27} \cdot Z_{L1-26}}{Z_{L3-27} + Z_{L1-26}} = \frac{0.03 + 0.182i \cdot 0.0294 + 0.181i}{0.03 + 0.182i + 0.0294 + 0.181i} = 0.015 + 0.091i \text{ Ом}$$

$$X_{22} = X_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.091 \cdot 0.73 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.066 \text{ Ом}$$

$$r_{22} = r_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 1.24 \cdot 0.73 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.905 \text{ Ом}$$

$$X_{15} = X_0 \cdot l_{7-15} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.083 \cdot 1.35 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.112 \text{ Ом}$$

$$r_{15} = r_0 \cdot l_{7-15} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.62 \cdot 1.35 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.84 \text{ Ом}$$

$$Z_{15,22} = 1.745 + 0.178i \text{ Ом}$$

$$X_{14} = X_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.083 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0365 \text{ Ом}$$

$$r_{14} = r_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{U_{\text{cp.oCH}}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.62 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.273 \text{ Ом}$$

$$X_{cd} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{cp.6,3}}^2}{S_{HOM}} = 0.2 \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{1 \cdot 10^6} = 7.94 \text{ Ом}$$

$$Z_{14,cd} = 0.273 + 8.013i \text{ Ом}$$

$$Z_{14,cd,15,22} = \frac{Z_{15,22} \cdot Z_{14,cd}}{Z_{15,22} + Z_{14,cd}} = \frac{1.745 + 0.178i \cdot 0.273 + 8.013i}{1.745 + 0.178i + 0.273 + 8.013i} \\ = 1.6 + 0.51i \text{ Ом}$$

$$X_7 = X_0 \cdot l_{3-7} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.078/2 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.017 \text{ Ом}$$

$$r_7 = r_0 \cdot l_{3-7} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.326/2 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.072 \text{ Ом}$$

$$Z_7 = 1.672 + 0.527 \text{ Ом}$$

$$X_{cd} = X_d'' \cdot \frac{U_{cp.6,3}^2}{S_{HOM}} = 0.2 \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{1.6 \cdot 10^6} = 4.96 \text{ Ом}$$

$$X_{20} = X_0 \cdot l_{11-20} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.083/2 \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.026 \text{ Ом}$$

$$r_{20} = r_0 \cdot l_{11-20} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.62/2 \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.195 \text{ Ом}$$

$$X_{11} = X_0 \cdot l_{5-11} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.078/2 \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0246 \text{ Ом}$$

$$r_{11} = r_0 \cdot l_{5-11} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.326/2 \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.1030 \text{ Ом}$$

$$Z_{11,20} = 0.298 + 0.0406i \text{ Ом}$$

$$X_{19} = X_0 \cdot l_{10-19} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.083 \cdot 0.59 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.049 \text{ Ом}$$

$$r_{19} = r_0 \cdot l_{10-19} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.62 \cdot 0.59 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.37 \text{ Ом}$$

$$X_{10} = X_0 \cdot l_{5-10} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.083/2 \cdot 1.2 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0498 \text{ Ом}$$

$$r_{10} = r_0 \cdot l_{5-10} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.62/2 \cdot 1.2 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.372 \text{ Ом}$$

$$Z_{10,19} = 0.742 + 0.0988i \text{ Ом}$$

$$Z_{10,11,19,20} = \frac{Z_{10,19} \cdot Z_{11,20}}{Z_{10,19} + Z_{11,20}} = \frac{0.742 + 0.0988i \cdot 0.298 + 0.0406i}{0.742 + 0.0988i + 0.298 + 0.0406i}$$

$$= 0.213 + 0.026i \text{ Ом}$$

$$X_{17} = X_0 \cdot l_{9-17} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6,i}} \right)^2 = 0.087/2 \cdot 0.82 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.036 \text{ Ом}$$

$$r_{17} = r_0 \cdot l_{9-17} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.89/2 \cdot 0.82 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.365 \text{ Ом}$$

$$X_{18} = X_0 \cdot l_{9-18} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.083/2 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0623 \text{ Ом}$$

$$r_{18} = r_0 \cdot l_{9-18} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = \frac{0.62}{2} \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.465 \text{ Ом}$$

$$Z_{17,18} = \frac{Z_{17} \cdot Z_{18}}{Z_{17} + Z_{18}} = \frac{0.365 + 0.036i \cdot 0.465 + 0.0623i}{0.365 + 0.036i + 0.465 + 0.0623i} = 0.204 + 0.023i \text{ Ом}$$

$$X_9 = X_0 \cdot l_{5-9} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.078/2 \cdot 0.9 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.0351 \text{ Ом}$$

$$r_9 = r_0 \cdot l_{5-9} \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.326/2 \cdot 0.9 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.147 \text{ Ом}$$

$$Z_{9,17,18} = 0.351 + 0.0581i \text{ Ом}$$

$$Z_{10,11,19,20,9,17,18} = \frac{Z_{10,11,19,20} \cdot Z_{9,17,18}}{Z_{10,11,19,20} + Z_{9,17,18}} = \frac{0.213 + 0.026i \cdot 0.351 + 0.0581i}{0.213 + 0.026i + 0.351 + 0.0581i} = 0.133 + 0.02i \text{ Ом}$$

$$X_5 = X_0 \cdot l_5 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.405/2 \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.1013 \text{ Ом}$$

$$r_5 = r_0 \cdot l_5 \left(\frac{U_{cp.oCH}}{U_{6.i}} \right)^2 = 0.121/2 \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} \right)^2 = 0.03 \text{ Ом}$$

$$Z_5 = 0.163 + 0.1013i \text{ Ом}$$

$$Z_{57} = \frac{Z_5 \cdot Z_7}{Z_5 + Z_7} = \frac{0.163 + 0.1213i \cdot 1.672 + 0.527i}{0.163 + 0.1213i + 1.672 + 0.527i} = 0.15 + 0.104i \text{ Ом}$$

$$Z_{cd} = \frac{Z_{cd1} \cdot Z_{cd2}}{Z_{cd1} + Z_{cd2}} = \frac{0 + 4.96i \cdot 0 + 7.94i}{0 + 4.96i + 0 + 7.94i} = 0 + 3.05i \text{ Ом}$$

$$Z_{57cd} = \frac{Z_{57} \cdot Z_{cd}}{Z_{57} + Z_{cd}} = \frac{0.15 + 0.104i \cdot 0 + 3.05i}{0.15 + 0.104i + 0 + 3.05i} = 0.141 + 0.1075i \text{ Ом}$$

$$Z_{ekb2} = \frac{Z_{cd57} \cdot Z_{gen}}{Z_{cd57} + Z_{gen}} = \frac{0.141 + 0.1075i \cdot 0.015 + 0.091i}{0.141 + 0.1075i + 0.015 + 0.091i} = 0.026 + 0.059i \text{ Ом}$$

$$E_{ек}^* = z_{екb2} \cdot \left(\frac{6300}{z_5} + \frac{E_{cd}^*}{z_7} + \frac{E_r^*}{z_{gen}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} \right) = (0.026 + 0.059i) \cdot$$

$$\left(\frac{6300}{0.163+0.1213i} + \frac{6930}{1.672+0.527i} + \frac{6804}{0.015+0.091i} + \frac{6930}{0+4.96i} + \frac{6930}{0+7.94i} \right) = (0.026 + 0.059i) \cdot$$

$$(24874.8 - 18511.15i + 3770.2 + 1188.3i + 11998.6 - 72791.4i + 0 -$$

$$1397.2i + 0 - 872.8i) = (0.026 + 0.059i) \cdot (40643.6 - 92384.1i) = 6507.4 -$$

$$4.01i \text{ Ом}$$

$$Z_{pez} = \frac{Z_{екb1} \cdot Z_{екb2}}{Z_{екb1} + Z_{екb2}} = \frac{0.094 + 0.561i \cdot 0.026 + 0.059i}{0.094 + 0.561i + 0.026 + 0.059i}$$

$$= 0.022 + 0.054i \text{ Ом}$$

$$E_{pez} = Z_{pez} \cdot \left(1 \cdot \frac{6300}{Z_{екb2}} + \frac{E_{GS}}{Z_{екb1}} \right)$$

$$= 0.022 + 0.054i \cdot \left(1 \cdot \frac{6300}{0.094 + 0.561i} + \frac{6507.4}{0.026 + 0.059i} \right)$$

$$= 6512.92 + 24.5i = 6512.96 * e^{0.22B}$$

$$I_{П4}^{(3)} = \frac{E_{pez}}{\sqrt{3} \cdot Z_{pez}} = \frac{6512.96}{\sqrt{3} \cdot 0.022 + 0.054i} = 24387.19 - 59783.81i$$

$$= 64566.5 \cdot e^{-67.8} \text{ A}$$

$$i_{yд} = \sqrt{2} \cdot I_{П4}^{(3)} \cdot K_{yд} = \sqrt{2} \cdot 64566.5 \cdot e^{-67.8} \cdot 1.31 = 119617.17 e^{-67.8} \text{ A}$$

$$K_{yд} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{\frac{3}{24387.19} \cdot \frac{-59783.81}{24387.19}} = 1.31$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{П4}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 6.3 \cdot 64.567 \cdot \sqrt{3} = 704.5 \text{ кВА}$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot I_{П4}^{(3)} \cdot i_{yд} = 6.3 \cdot \sqrt{3} \cdot 119.617 = 1305.3 \text{ кВА}$$

Розрахунок у відносних одиницях

$$E_{GS}^* = \frac{E_{GS}}{U_{ср.очн}} = \frac{6.3 \cdot 10^3}{6.3 \cdot 10^3} = 1 \text{ в. о.}$$

$$Z_{GS}^* = X_C^* \cdot \frac{S_b}{S_{НОМ}} = 0.25 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{320 \cdot 10^6} = 0.25 \text{ Ом}$$

$$X_{L1}^* = X_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.444/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.4297 \text{ в. о.}$$

$$r_{L1}^* = r_0 \cdot l \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.428/2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(115 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.414 \text{ в. о.}$$

$$Z_{T2B}^* = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kBH} + U_{kBC} - U_{kCH}) \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (17.5 + 10.5 - 6.5) \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 1.376 \text{ B. o}$$

$$Z_{T2C}^* = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{kCH} + U_{kBC} - U_{kBH}) \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (6.5 + 10.5 - 17.5) \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = -0.032 = 0 \text{ OM}$$

$$r_{T2}^* = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{HOMT2}} \cdot \frac{S_b}{S_{HOMT2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0.0358 \text{ B. o}$$

$$X_{L2}^* = X_0 \cdot l_2 \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.421/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(37 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.084 \text{ B. o.}$$

$$r_{L2}^* = r_0 \cdot l_2 \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.306/2 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(37 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.061 \text{ B. o.}$$

$$X_B^* = \sqrt{Z_{T2B}^{*2} - \left(\frac{r_{T2}^*}{2} \right)^2} = \sqrt{1.376^2 - \left(\frac{0.0358}{2} \right)^2} = 1.376 \text{ B. o}$$

$$X_C^* = \sqrt{Z_{T2C}^{*2} - \left(\frac{r_{T2}^*}{2} \right)^2} = \sqrt{0 - \left(\frac{0.0358}{2} \right)^2} = 0 \text{ B. o}$$

$$Z_{T4B}^* = \frac{U_{kBH-HH} \cdot S_6}{100 \cdot S_{HOMT4}} = \frac{7.5 \cdot 320 \cdot 10^6}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 2.4 \text{ B. o.}$$

$$r_{T4B}^* = \frac{\Delta P}{S_{HOMT4}} \cdot \frac{S_6}{S_{HOMT4}} = \frac{65000}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 0.208 \text{ B. o.}$$

$$X_{T4B}^* = \sqrt{Z_{T4B}^{*2} - r_{T4B}^{*2}} = 2.39 \text{ B. o.}$$

$$Z_{ekb} = X_{GS}i + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{Xb} + Z_{Xc} + Z_{T4} =$$

$$= 0.25i + (0.414 + 0.4297i) + (0.061 + 0.084i)$$

$$+ (0.0358 + 1.376i) + (0.0358 + 0i) + (0.208 + 2.39i)$$

$$= 0.758 + 4.53i \text{ B. o.}$$

$$X_{L3-27}^* = X_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.071/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.143 \text{ B. o.}$$

$$r_{L3-27}^* = r_0 \cdot l_{3-27} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.121/6 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.244 \text{ B. o.}$$

$$X_{GS\Gamma 2}^* = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOMT4}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 1.32 \text{ B. o.}$$

$$X_{L1-26}^* = X_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.071/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.139 \text{ B. o.}$$

$$r_{L1-26}^* = r_0 \cdot l_{1-26} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.121/7 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.236 \text{ B. o.}$$

$$X_{GS\Gamma 1}^* = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOMT4}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 1.32 \text{ B. o.}$$

$$Z_{L1-26} = X_{GS\Gamma 1} + r_{L1-25} + X_{L1-26} = 0.236 + 1.459i \text{ B. o.}$$

$$Z_{L3-27} = X_{GS\Gamma 1} + r_{L3-27} + X_{L3-27} = 0.244 + 1.463i \text{ B. o.}$$

$$Z_{\text{reh}} = \frac{Z_{L3-27} \cdot Z_{L1-26}}{Z_{L3-27} + Z_{L1-26}} = \frac{0.244 + 1.463i \cdot 0.236 + 1.459i}{0.244 + 1.463i + 0.236 + 1.459i} = 0.12 + 0.73i \text{ B. o.}$$

$$X_{22} = X_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.091 \cdot 0.73 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.54 \text{ B. o.}$$

$$r_{22} = r_0 \cdot l_{15-22} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 1.24 \cdot 0.73 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 7.3 \text{ B. o.}$$

$$X_{15} = X_0 \cdot l_{7-15} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.083 \cdot 1.35 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.903 \text{ B. o.}$$

$$r_{15} = r_0 \cdot l_{7-15} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.62 \cdot 1.35 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 6.74 \text{ B. o.}$$

$$Z_{15,22} = 14.04 + 1.443i \text{ B. o.}$$

$$X_{14} = X_0 \cdot l_{7-14} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.083 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.294 \text{ B. o.}$$

$$r_{14} = r_0 \cdot l_{7-14} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.62 \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 2.2 \text{ B. o.}$$

$$X_{cd} = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOM}} = 0.2 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^6} = 64 \text{ B. o.}$$

$$Z_{14,cd} = 2.2 + 64.294i \text{ B. o.}$$

$$Z_{14,cd,15,22} = \frac{Z_{15,22} \cdot Z_{14,cd}}{Z_{15,22} + Z_{14,cd}} = \frac{14.04 + 1.443i \cdot 2.2 + 64.294i}{14.04 + 1.443i + 2.2 + 64.294i} = 12.8 + 4.095i \text{ B. o.}$$

$$X_7 = X_0 \cdot l_{3-7} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.078}{2} \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.138 \text{ B. o.}$$

$$r_7 = r_0 \cdot l_{3-7} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.326}{2} \cdot 0.44 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.578 \text{ B. o.}$$

$$Z_7 = 13.378 + 4.233 \text{ B. o.}$$

$$X_{cd} = X_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{HOM}} = 0.2 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{1.6 \cdot 10^6} = 40 \text{ B. O}$$

$$X_{20} = X_0 \cdot l_{11-20} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.083}{2} \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.21 \text{ B. O}$$

$$r_{20} = r_0 \cdot l_{11-20} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right)^2 = \frac{0.62}{2} \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 1.57 \text{ B. O}$$

$$X_{11} = X_0 \cdot l_{5-11} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.078}{2} \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.198 \text{ B. O}$$

$$r_{11} = r_0 \cdot l_{5-11} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.326}{2} \cdot 0.63 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.828 \text{ B. O}$$

$$Z_{11,20} = 2.398 + 0.408i$$

$$X_{19} = X_0 \cdot l_{10-19} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.083 \cdot 0.59 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.395 \text{ B. O}$$

$$r_{19} = r_0 \cdot l_{10-19} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = 0.62 \cdot 0.59 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 2.94 \text{ B. O}$$

$$X_{10} = X_0 \cdot l_{5-10} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.083}{2} \cdot 1.2 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.402 \text{ B. O}$$

$$r_{10} = r_0 \cdot l_{5-10} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right)^2 = \frac{0.62}{2} \cdot 1.2 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 1.2 \text{ B. O}$$

$$Z_{10,19} = 4.14 + 0.797i \text{ B. O}$$

$$Z_{10,11,19,20} = \frac{Z_{10,19} \cdot Z_{11,20}}{Z_{10,19} + Z_{11,20}} = \frac{4.14 + 0.797i \cdot 2.398 + 0.408i}{4.14 + 0.797i + 2.398 + 0.408i} = 1.518 + 0.27i \text{ B. O}$$

$$X_{17} = X_0 \cdot l_{9-17} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.087}{2} \cdot 0.82 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.288 \text{ B. O}$$

$$r_{17} = r_0 \cdot l_{9-17} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.89}{2} \cdot 0.82 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 2.94 \text{ B. O}$$

$$X_{18} = X_0 \cdot l_{9-18} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.083}{2} \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.501 \text{ B. O}$$

$$r_{18} = r_0 \cdot l_{9-18} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.62}{2} \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 3.75 \text{ B. O}$$

$$Z_{17,18} = \frac{Z_{17} \cdot Z_{18}}{Z_{17} + Z_{18}} = \frac{2.94 + 0.288i \cdot 3.75 + 0.501i}{2.94 + 0.288i + 3.75 + 0.501i} = 1.64 + 0.187i \text{ B. O}$$

$$X_9 = X_0 \cdot l_{5-9} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.078}{2} \cdot 0.9 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.283 \text{ B. O}$$

$$r_9 = r_0 \cdot l_{5-9} \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.326}{2} \cdot 0.9 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 1.18 \text{ B. o}$$

$$Z_{9,17,18} = 2.82 + 0.47i$$

$$Z_{10,11,19,20,9,17,18} = \frac{Z_{10,11,19,20} \cdot Z_{9,17,18}}{Z_{10,11,19,20} + Z_{9,17,18}} = \frac{1.518 + 0.27i \cdot 2.82 + 0.47i}{1.518 + 0.27i + 2.82 + 0.47i} = 0.986 + 0.171i \text{ B. o}$$

$$X_5 = X_0 \cdot l_5 \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.405}{2} \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.816 \text{ B. o}$$

$$r_5 = r_0 \cdot l_5 \left(\frac{S_6}{U_{6,i}^2} \right) = \frac{0.121}{2} \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{320 \cdot 10^6}{(6.3 \cdot 10^3)^2} \right) = 0.244 \text{ B. o}$$

$$Z_5 = 1.23 + 0.987i \text{ B. o}$$

$$Z_{57} = \frac{Z_5 \cdot Z_7}{Z_5 + Z_7} = \frac{1.23 + 0.987i \cdot 13.378 + 4.233}{1.23 + 0.987i + 13.378 + 4.233} = 1.145 + 0.851i \text{ B. o}$$

$$Z_{cd} = \frac{Z_{cd1} \cdot Z_{cd2}}{Z_{cd1} + Z_{cd2}} = \frac{0 + 40i \cdot 0 + 64i}{0 + 40i + 0 + 64i} = 0 + 24.6i \text{ B. o}$$

$$Z_{57cd} = \frac{Z_{57} \cdot Z_{cd}}{Z_{57} + Z_{cd}} = \frac{1.145 + 0.851i \cdot 0 + 24.6i}{1.145 + 0.851i + 0 + 24.6i} = 1.067 + 0.87i \text{ B. o}$$

$$Z_{ekb2} = \frac{Z_{cd57} \cdot Z_{gen}}{Z_{cd57} + Z_{gen}} = \frac{1.067 + 0.87i \cdot 0.12 + 0.73i}{1.067 + 0.87i + 0.12 + 0.73i} = 0.2034 + 0.47i \text{ B. o}$$

$$E_{ek}^* = z_{ekb2} \cdot \left(\frac{6300}{z_5} + \frac{E_{cd}^*}{z_7} + \frac{E_r^*}{z_{gen}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot$$

$$\left(\frac{1}{1.23+0.987i} + \frac{1.1}{13.378+4.233} + \frac{1.08}{0.12+0.73i} + \frac{1.1}{0+40i} + \frac{1.1}{0+64i} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot$$

$$(0.495 - 0.397i + 0.0747 - 0.024i + 0.237 - 1.44i + 0 - 0.0275i + 0 - 0.01725i) = (0.2034 + 0.47i) \cdot (0.807 - 1.91i) = 1.062 - 0.009i \text{ B. o}$$

$$Z_{pez}^* = \frac{Z_{ekb1}^* \cdot Z_{ekb2}^*}{Z_{ekb1}^* + Z_{ekb2}^*} = \frac{0.758 + 4.53i \cdot 0.2034 + 0.47}{0.758 + 4.53i + 0.2034 + 0.47} = 0.1773 + 0.428i \text{ B. o}$$

$$E_{pez}^* = Z_{pez}^* \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{Z_{ekb2}^*} + \frac{E_{GS}^*}{Z_{ekb1}^*} \right)$$

$$= 0.1773 + 0.428i \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{0.2034 + 0.47} + \frac{1.062}{0.758 + 4.53i} \right)$$

$$= 1.0078 - 0.00987i \text{ B. o}$$

$$I_{\Pi 4}^* = \frac{E_{pez}^*}{Z_{pez}^*} = \frac{1.0078 - 0.00987i}{0.1773 + 0.428i} = 0.8129 - 2.018i \text{ B. o}$$

$$I_b = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6,i}} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6.3 \cdot 10^3} = 29325.73A$$

$$I_{п2} = I_{п2}^* \cdot I_b = 0.8129 - 2.018i \cdot 29325.73 = 23388.29 - 59177.85i \\ = 63798.8 \cdot e^{-68} A$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п4}^{(3)} \cdot K_{уд} = \sqrt{2} \cdot 63798.8 \cdot e^{-68} \cdot 1.31 = 118194.9e^{-68} A$$

$$K_{уд} = 1.02 + 0.98 \cdot e^{\frac{3}{24387.19} \cdot \frac{59783.81}{}} = 1.31$$

$$S_{kzmin} = E_{GS} \cdot I_{п4}^{(3)} \cdot \sqrt{3} = 6.3 \cdot 63.8 \cdot \sqrt{3} = 696.2кВА$$

$$S_{kzmax} = E_{GS} \cdot I_{п4}^{(3)} \cdot i_{уд} = 6.3 \cdot \sqrt{3} \cdot 118.2 = 1289.7 кВА$$

Таблиця 2.1- Результати розрахунків

Точка кз		Ip0,кА	iуд,кА	Skзмін	Skзмакс
К1	Ім.	6.43	18.2	1.28МВА	3.63МВА
	Відн	6.44	18.21	1.28МВА	3.63МВА
	%, похибка	0.05	0.05	0	0
	Середнє значення	6.435	18.205	1.28МВА	3.63МВА
К2	Ім.	2.017 $\cdot e^{-j58.5}$	3.366 $\cdot e^{-j58.5}$	401.8кВА	670.5кВА
	Відн	2.018 $\cdot e^{-58.63}$	3.367 $\cdot e^{-58.63}$	402.1кВА	670.8кВА
	%, похибка	0.047	0.029	0.07	0.045
	Середнє значення	2.0175e ^{-j58.5}	3.3665e ^{-j58.5}	401.95кВА	670.65кВА
К3	Ім.	4.021e ⁻⁸¹	9.214 e ⁻⁸¹	257.7 кВА	590.5 кВА
	Відн	4.019e ⁻⁸¹	9.209 e ⁻⁸¹	257.6 кВА	590.2 кВА
	%, похибка	0.049	0.054	0.038	0.05
	Середнє значення	4.02e ⁻⁸¹	9.2115 e ⁻⁸¹	257.65 кВА	590.35 кВА
К4	Ім.	64.6 · e ^{-j67.8}	119.6 $\cdot e^{-j67.8}$	704.5 кВА	1305.3 кВА
	Відн	63.8 · e ⁻⁶⁸	118.2 · e ^{-j68}	696.2 кВА	1289.7 кВА
	%, похибка	1.5	1.18	1.18	1.19
	Середнє значення	64.2 · e ⁻⁶⁸	118.9 · e ^{-j68}	700.4 кВА	1297.5 кВА

4.3. Розрахунок струмів КЗ в різні проміжки часу

Знайдемо струм, що проходить через генератори:

$$I_{\Gamma 2} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сер}}} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2291(\text{A})$$

$$I_{\text{п.г.2}}^* = \frac{E_{\Gamma}^*}{Z_{17}} = \frac{1,08}{0,236 + 1,459i} = 0,117 - j0,721$$

$$I_{\text{п.г.2}} = I_{\text{п.г.2}}^* \cdot I_{\text{баз.6.3}} = 21,4 \cdot e^{-j80,78}(\text{кА})$$

$$I^* = \frac{I_{\text{п.г.2}}}{I_{\Gamma 2}} = 9,34$$

$$I_{\Gamma 1} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сер}}} = \frac{27,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2502(\text{A})$$

$$I_{\text{п.г.1}}^* = \frac{E_{\Gamma}^*}{Z_{17}} = \frac{1,08}{0,244 + 1,463i} = 0,1198 - j0,718$$

$$I_{\text{п.г.1}} = I_{\text{п.г.1}}^* \cdot I_{\text{баз.6.3}} = 21,35 \cdot e^{-j80,52}(\text{кА})$$

$$I^* = \frac{I_{\text{п.г.1}}}{I_{\Gamma 1}} = 8,533$$

I^* – коефіцієнт, що характеризує ел. віддаленість;

З даних, запишемо значення часу:

$$T_1 = 0,15$$

$$T_2 = 0,33$$

Знаючи коефіцієнт ел. віддаленості та час, знаходимо з графіку два параметри:

$$Y_{T_1} \text{ та } Y_{T_2}: Y_{T_1} = 0,65$$

$$Y_{T_2} = 0,56$$

Розраховуємо значення струму при $Y_{T_1} = 0,65$:

$$E_{cd}^* \cdot Y_{T_1} = 1,1 \cdot 0,65 = 0,715$$

$$E_{\Gamma}^* \cdot Y_{T_1} = 1,08 \cdot 0,65 = 0,702$$

$$E_{ек}^* = z_{екb2} \cdot \left(\frac{1}{z_5} + \frac{E_{cd}^*}{z_7} + \frac{E_{\Gamma}^*}{z_{gen}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot \left(\frac{1}{1.23+0.987i} + \frac{0,715}{13.378+4.233} + \frac{0,702}{0.12+0.73i} + \frac{0,715}{0+40i} + \frac{0,715}{0+64i} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot (0.495 - 0.397i + 0.0485 - 0.0154i + 0.154 - 0.936i + 0 - 0.0179i + 0 - 0.01117i) = (0.2034 + 0.47i) \cdot (0.698 - 1.38i) = 0.791 - 0.0047i \text{ в. о}$$

Використовуючи значення опорів із минулого пункту (розрахунок струмів

К.3

4 точки):

$$E_{T1} = Z_{pez}^* \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{Z_{екb2}^*} + \frac{E_{GS}^*}{Z_{екb1}^*} \right) = 0.1773 + 0.428i \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{0.2034+0.47} + \frac{0.791}{0.758+4.53i} \right) = 0.982 - 0.0038i \text{ в. о}$$

$$I_{T1}^* = \frac{E_{T1}^*}{Z_{20}} = \frac{0.982}{0.1773 + 0.428i} = 2.1197 \cdot e^{-j67.5}$$

$$I_b = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6,i}} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6.3 \cdot 10^3} = 29325.73A$$

Отже струм буде дорівнювати:

$$I_{T1} = I_{баз.4} \cdot I_{п.к.4}^* = 29.325 \cdot 2.1197 \cdot e^{-j67.5} = 62,2 \cdot e^{-j67.5} (\text{кА})$$

$$i_{T1} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{к.п.4} = \sqrt{2} \cdot 1.31 \cdot 62,2 \cdot e^{-j67.5} = 115.23 \cdot e^{-j67.5} (\text{кА})$$

Розраховуємо значення струму при $Y_{T2} = 0,56$:

$$E_{cd}^* \cdot Y_{T2} = 1,1 \cdot 0,56 = 0,616$$

$$E_{\Gamma}^* \cdot Y_{T2} = 1,08 \cdot 0,56 = 0,605$$

$$E_{ек}^* = z_{екb2} \cdot \left(\frac{1}{z_5} + \frac{E_{cd}^*}{z_7} + \frac{E_{\Gamma}^*}{z_{gen}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} + \frac{E_{cd}^*}{z_{cd}} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot \left(\frac{1}{1.23+0.987i} + \frac{0,616}{13.378+4.233} + \frac{0,605}{0.12+0.73i} + \frac{0,616}{0+40i} + \frac{0,616}{0+64i} \right) = (0.2034 + 0.47i) \cdot (0.494 - 0.396i + 0.0419 - 0.0132i + 0.133 - 0.807i + 0 - 0.0154i + 0 - 0.0096i) = (0.2034 + 0.47i) \cdot (0.66 - 1.24i) = 0.72 + 0.057i \text{ в. о}$$

$$E_{T2} = Z_{pez}^* \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{Z_{ekb2}^*} + \frac{E_{GS}^*}{Z_{ekb1}^*} \right) = 0.1773 + 0.428i \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{0.2034 + 0.47i} + \frac{0.72}{0.758 + 4.53i} \right) = 0.9743 - 0.0025 \text{ в. о}$$

$$I_{T2}^* = \frac{E_{T1}^*}{Z_{20}} = \frac{0.97}{0.1773 + 0.428i} = 2.09 \cdot e^{-j67.6}$$

Отже струм буде дорівнювати:

$$I_{T2} = I_{баз.4} \cdot I_{п.к.4}^* = 29.325 \cdot 2.09 \cdot e^{-j67.6} = 61.3 \cdot e^{-j67.5} \text{ (кА)}$$

$$i_{T2} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{к.п.4} = \sqrt{2} \cdot 1.31 \cdot 61.3 \cdot e^{-j67.5} = 113.56 \cdot e^{-j67.5} \text{ (кА)}$$

4.4. Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1кВ

Потрібно визначити ймовірні максимальне і мінімальне значення струму в початковий момент КЗ в точці К1 і до моменту відключення КЗ ($t_{откл} = 0,6 \text{ с}$). Вихідні дані наведені нижче:

Система С: $S_k = 150 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{ср.ВН} = 6,0 \text{ кВ}$.

Трансформатор типу ТСЗС-1000/6,0; $U_k = 8 \%$; $U_{ВН} = 6,3 \text{ кВ}$; $U_{НН} = 0,4 \text{ кВ}$;
 $P_k = 11,2 \text{ кВт}$.

Автоматичні вимикачі:

QF1 "Електрон": $I_{ном} = 1000 \text{ А}$; $R_{кв1} = 0,25 \text{ мОм}$; $X_{кв1} = 0,1 \text{ мОм}$;

QF2-А3794С: $I_{ном} = 400 \text{ А}$; $R_{кв2} = 0,65 \text{ мОм}$; $X_{кв2} = 0,17 \text{ мОм}$;

QF3-АЕ2056: $I_{ном} = 100 \text{ А}$; $R_{кв3} = 2,15 \text{ мОм}$; $X_{кв3} = 1,2 \text{ мОм}$.

Шинопровід Ш1: ШМА-4-1600; $L_1 = 15 \text{ м}$; $R_{1ш1} = 0,03 \text{ мОм/м}$; $X_{1ш1} = 0,014 \text{ мОм/м}$;
 $R_{0ш1} = 0,037 \text{ мОм/м}$; $X_{0ш1} = 0,042 \text{ мОм/м}$.

Кабельні лінії:

КБ1: АВВГ-3х185 +1 х70; $L_2 = 50 \text{ м}$; $R_1 = 0,208 \text{ мОм/м}$; $X_1 = 0,063 \text{ мОм/м}$;

$R_0 = 0,989 \text{ мОм/м}$; $X_0 = 0,244 \text{ мОм/м}$;

КБ2: АВВГ-3х35 +1 х16; $L_3 = 20 \text{ м}$; $R_1 = 1,1 \text{ мОм/м}$; $X_1 = 0,068 \text{ мОм/м}$;

$R_0 = 2,63 \text{ мОм/м}$; $X_0 = 0,647 \text{ мОм/м}$.

Болтові контактні з'єднання: $R_k = 0,003 \text{ мОм}$; $n = 10$.

Значення параметрів схеми заміщення прямої послідовності: опір системи (X_c), розраховане за формулою становить:

$$X_c = \frac{(400)^2}{150} \cdot 10^{-3} = 1,066 \text{ мОм}$$

Активний і індуктивний опори трансформатора (R_T) і (X_T) складають:

$$R_T = \frac{11,2 \cdot 0,4^2}{(1000)^2} \cdot 10^6 = 1,79 \text{ мОм};$$

$$X_T = \sqrt{8^2 - \left(\frac{100 \cdot 11,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 12,67 \text{ мОм}$$

Активний і індуктивний опори шинопровода:

$$R_{\text{шл}} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{шл}} = 0,014 \cdot 15 = 0,21 \text{ мОм};$$

Активного опору кабелів різних перетинів з мідними жилами при дуговому КЗ з урахуванням тепловіддачі при тривалості КЗ 1,0 с (суцільні криві) і 1,5 с (пунктирні криві);

$$\text{активний опір болтових контактних з'єднань: } R_k = 0,003 \cdot 10 = 0,03 \text{ мОм};$$

активний і індуктивний опори кабельних ліній:

$$\text{КБ1: } R_{\text{кб1}} = 0,208 \cdot 50 = 10,4 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{кб1}} = 0,063 \cdot 50 = 3,15$$

мОм;

$$\text{КБ2: } R_{\text{кб2}} = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{кб2}} = 0,068 \cdot 20 = 1,36$$

мОм.

Значення параметрів схеми заміщення нульової послідовності:

$$R_{0T} = 154 \text{ мОм};$$

$$X_{0T} = 59 \text{ мОм};$$

$$R_{0\text{шл}} = 0,037 \cdot 15 = 0,555 \text{ мОм};$$

$$X_{0\text{шл}} = 0,042 \cdot 15 = 0,63 \text{ мОм};$$

$$R_{0\text{кб1}} = 0,989 \cdot 50 = 49,45 \text{ мОм};$$

$$X_{0\text{кб1}} = 0,244 \cdot 50 = 12,2 \text{ мОм};$$

$$R_{0\text{кб2}} = 2,63 \cdot 20 = 52,6 \text{ мОм};$$

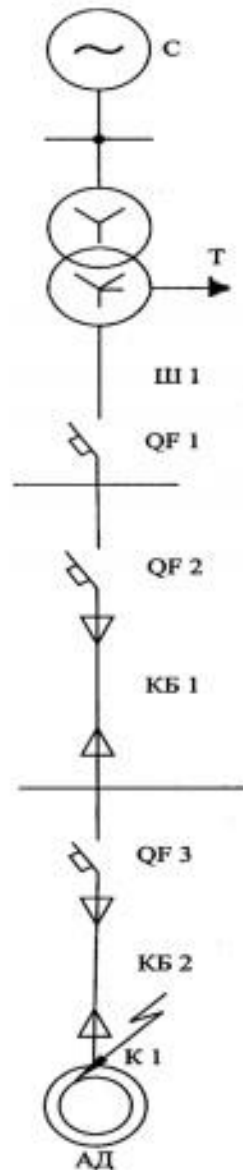
$$X_{0\text{кб2}} = 0,647 \cdot 20 = 12,94 \text{ мОм}.$$

Сумарні опори щодо точки КЗ К1:

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{1ш1} + R_{1к61} + R_{1к62} + R_{кБ1} + R_{кБ2} + R_{кБ3} + R_K = 1,79 + 0,45 + 22 +$$

$$+ 0,25 + 0,65 + 2,15 + 0,03 = 37,72 \text{ МОМ};$$

$$X_{1\Sigma} = X_T + X_{1ш1} + X_{1к61} + X_{1к62} + X_{кБ1} + X_{кБ2} + X_{кБ3} = 12,67 + 0,21 + 3,15 + 1,36 + 0,1 + 0,17 + 1,2 = 18,86 \text{ МОМ}.$$



Початкове значення періодичної складової струму при металевому КЗ:

$$I_{n0max}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{37,72^2 + 18,86^2}} = 5,48 \text{ кА}$$

Початкове значення періодичної складової струму дугового КЗ визначається з урахуванням опору дуги.

Активний опір дуги в початковий момент КЗ, що визначається за формулою становить:

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{3 \cdot I_{\text{по}}^2 \cdot K_c^2} - X_{1\Sigma}^2 - R_{1\Sigma}} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 5,48^2 \cdot 0,78^2} - 18,86^2 - 37,72} = 12,9 \text{ мОм};$$

Середнє (ймовірне) початкове значення струму дугового КЗ складає:

$$I_{\text{п0д}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(37,72 + 12,9)^2 + 18,86^2}} = 4,28 \text{ кА};$$

Максимальний і мінімальний струм (3) п0 д I визначаються з урахуванням відповідних значень коефіцієнту Кс:

$$I_{\text{п0д max}}^{(3)} = 0,896 \cdot 5,48 = 4,9 \text{ кА};$$

$$I_{\text{п0д min}}^{(3)} = 0,64 \cdot 5,48 = 3,5 \text{ кА}.$$

Коефіцієнт збільшення активного опору кабелю КБ1 при металевому КЗ без урахування тепловіддачі становить:

$$K_{v_{\text{к.кб1а}}} = \frac{\tau_p + v_{\text{к.кб1а}}}{\tau_p + v_{\text{н.кб1}}} = \frac{236 + 26}{236 + 20} = 1,024$$

де $v_{\text{к.кб1а}}$ - кінцева температура при адіабатичному нагріванні. Вона становить:

$$v_{\text{к.кб1а}} = 26^\circ\text{C};$$

Кінцева температура жил кабельної лінії КБ1 з урахуванням тепловіддачі:

$$\vartheta_{\text{к.кб1}} = \vartheta_{\text{н.кб1}} + (\vartheta_{\text{к.кб1}} - \vartheta_{\text{н.кб1}}) \cdot \eta = 20 + (26 - 20) \cdot 0,968 = 25,8 \text{ }^\circ\text{C},$$

де коефіцієнт η знайдений по кривих .

Коефіцієнт збільшення активного опору кабелю КБ1 з урахуванням тепловіддачі $K_{\vartheta_{\text{кб1}}} = 1,022$.

Відповідно для кабелю КБ2:

$$\vartheta_{к.кб2a} = (20 + 228) \exp \left[\frac{5,48^2 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{148^2 \cdot 35^2 \cdot 1,0375^2} \right] - 228 = 234,8^\circ\text{C};$$

$$\vartheta_{к.кб2} = 20 + (234,8 - 20) \cdot 0,92 = 217,6^\circ\text{C} \text{ та } K_{\vartheta_{кб2}} = 1,77$$

Тому значення періодичної складової струму трифазного КЗ до моменту відключення КЗ з урахуванням нагріву кабелів:

$$I_{nt}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(10,4 \cdot 1,022 + 22 \cdot 1,77 + 5,32)^2}} = 3,98 \text{ кА}$$

Опір електричної дуги до моменту відключення КЗ складає:

$$R_{dt} = \sqrt{\frac{U_{cp.HH}^2}{3 \cdot I_{nt}^2 \cdot K_{ct}^2} - X_{1\Sigma}^2} - R_{1\Sigma T} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 3,98^2 \cdot 0,74^2} - 18,86^2} - 54,9$$

$$= 21,2 \text{ мОм},$$

де $K_{ct} = 0,55 - 0,002 \cdot 58 + 0,1\sqrt{58} - 0,12\sqrt[3]{58} = 0,74$ так як:

$$Z_{kt} = \sqrt{(10,4 \cdot 1,022 + 22 \cdot 1,77 + 5,32)^2 + 18,86^2} = 58 \text{ мОм}.$$

Середнє значення періодичної складової струму КЗ до моменту відключення з урахуванням впливу нагріву і електричної дуги:

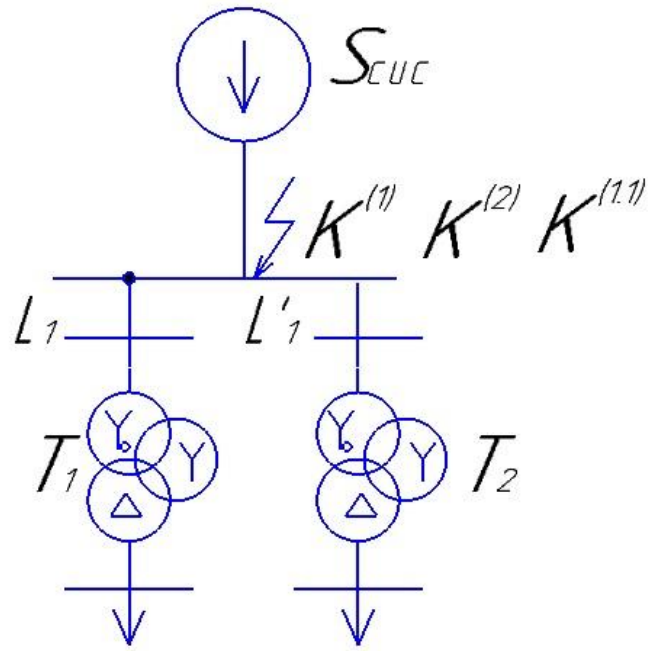
$$I_{nt}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(10,4 \cdot 1,01 + 22 \cdot 1,7 + 21,2 + 5,32)^2 + 18,86^2}} = 3 \text{ кА}$$

Значення $K_{\vartheta_{кб1}}$ і $K_{\vartheta_{кб2}}$ визначені з урахуванням впливу тепловіддачі і активного опору дуги по кривих для $t_{відкл} = 0,6$ с. Максимальне і мінімальне імовірні значення струму $I_{nt}^{(3)}$ визначені з урахуванням коефіцієнту K_{ct} :

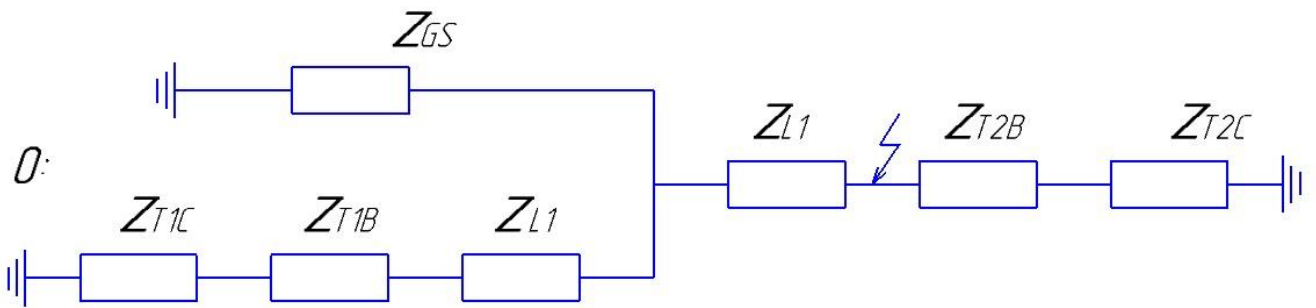
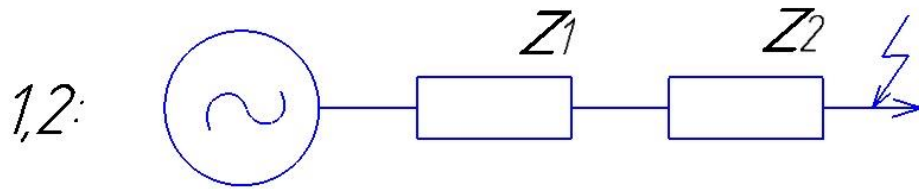
$$I_{ntд max}^{(3)} = 3,98 \cdot 0,81 = 3,22 \text{ кА};$$

$$I_{ntд min}^{(3)} = 3,98 \cdot 0,65 = 2,59 \text{ кА};$$

4.5. Розрахунок несиметричних КЗ



Для обох послідовностей потрібно зробити схеми заміщення, які будуть виглядати:



$$Z_{0.1} = Z_{T1C} + Z_{T1B} + Z_{L1}$$

$$Z_{0.2} = Z_{T2C} + Z_{T2B}$$

$$Z_{GS}^{*1,2} = j0,25;$$

$$Z_{GS}^{*0} = 0,5 \cdot Z_{GS}^{*1,2} = j0,125;$$

$$Z_{T1B}^{*1,2} = 0,0358 + j1,376 = Z_{T2B}^*$$

$$Z_{T1C}^{*1,2} = 0,0358 = Z_{T2C}^*$$

$$Z_{L1}^{*1,2} = Z_{L1}^* = 0,414 + j0,4297$$

$$Z_{L1}^{*0} = 3,5 \cdot Z_{L1}^{*1,2} = 1,449 +$$

$$j1,504$$

$$Z_{\Sigma}^{*1,2} = Z_1^* + Z_2^* = j0,25 + 0,414 + j0,4297 = 0,414 + j0,6797$$

Для нульової послідовності:

$$\begin{aligned} Z_{0.1}^{*0} &= Z_{T1C}^* + Z_{T1B}^* + Z_{L1}^* = 0,0358 + 0,0358 + j1,376 + 1,449 + j1,504 \\ &= 1,521 + j2,88 \end{aligned}$$

$$Z_{0.2}^{*0} = Z_{T2C}^* + Z_{T2B}^* = 0,0358 + 0,0358 + j1,376 = 0,0716 + j1,376$$

$$Z_{0.3}^{*0} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{0.1}^{*0}} + \frac{1}{Z_{GS}^{*0}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,521 + j2,88} + \frac{1}{j0,125}} = 0,002184 + j0,121$$

$$Z_{0.4}^{*0} = Z_{0.3}^{*0} + Z_{L1}^* = 0,002184 + j0,121 + 1,449 + j1,504 = 1,451 + j1,623$$

$$Z_{ек.}^{*0} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{0.4}^{*0}} + \frac{1}{Z_{0.2}^{*0}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,451 + j1,623} + \frac{1}{0,0716 + j1,376}} = 0,2742 + j0,8496$$

Значення струмів буде дорівнювати:

$$I_n^{(n)} = \frac{m^{(n)} \cdot E_{A\Sigma}}{(x_{1рез} + x_{\Delta}^{(n)})}$$

$$I_n^{1*} = \frac{3 \cdot E_{A\Sigma}}{(Z_{1рез}^* + Z_{2рез}^* + Z_{0рез}^*)}$$

$$= \frac{3 \cdot 1}{(0,414 + j0,6797 + 0,414 + j0,6797 + 0,2742 + j0,8496)} =$$

$$= \frac{3}{1,102 + j2,209} = 1,215 \cdot e^{-j63,5}$$

$$I_n^{2*} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{A\Sigma}}{(Z_{1рез}^* + Z_{2рез}^*)} = \frac{\sqrt{3}}{0,414 + j0,6797 + 0,414 + j0,6797} = \frac{\sqrt{3}}{0,178 + j0,972}$$

$$= 1,09 \cdot e^{-j58,6}$$

$$I_n^{1.1*} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\frac{1 - Z_{2\text{рез}}^* \cdot Z_{0\text{рез}}^*}{Z_{2\text{рез}}^* + Z_{0\text{рез}}^*}} \cdot E_{A\Sigma}}{(Z_{1\text{рез}}^* + Z_{2\text{рез}}^* + Z_{0\text{рез}}^*)}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,414 + j0,6797 * 0,2742 + j0,8496}{0,414 + j0,6797 + 0,2742 + j0,8496}} \cdot 1}{(0,414 + j0,6797 + 0,414 + j0,6797 + 0,2742 + j0,8496)}$$

$$= 0.591 \cdot e^{-j66,13}$$

Отже, знаючи значення струмів у відносних одиниця, домножимо їх на базисний струм і отримаємо такі значення:

$$I_n^1 = I_n^{1*} \cdot I_{\text{баз.115}} = 1,215 \cdot e^{-j63,5} \cdot 1,61 = 1.96 \cdot e^{-j63,5} \text{ (кА)}$$

$$I_n^2 = I_n^{2*} \cdot I_{\text{баз.115}} = 1,09 \cdot e^{-j58,6} \cdot 1,61 = 1.755 \cdot e^{-j58,6} \text{ (кА)}$$

$$I_n^{1.1} = I_n^{1.1*} \cdot I_{\text{баз.115}} = 0.591 \cdot e^{-j66,13} \cdot 1,61 = 0.952 \cdot e^{-j66,13} \text{ (кА)}$$

4.6. Розрахунок струмів замикання на землю

Лінія	3-27	3-7	7-14	7-15	15-22	1-5	5-9	5-10	5-11	9-17	9-18
Км	1.5	0,55	0.44	1.35	0,73	0,5	0,9	0,59	0,63	0,82	1.5
Лінія	11-20	1-26									
Км	0.63	1.7									

$$L_H = \frac{U_\phi}{I_{CM} \cdot \omega} = \frac{6.3 \cdot 10^3}{25.21 \cdot 314} = 0.46$$

Розрахувавши струми замикань на землю отримано наступні параметри подані в таблиці

Вид струму КЗ	А
I_{CM}	7.64
$I_{3\Sigma}$	12.854
I_{CM}	25.21

4.7. Електродинамічна стійкість та перевірка на термічну стійкість

Перевірити електродинамічну стійкість трифазної шинної конструкції, ізолятори якої мають високу жорсткість, якщо відомо, що розрахунковий ударний струм КЗ $i_{уд}^{(3)} = 180$ кА, а шини виконані з алюмінієвого сплаву марки АД31Т1, мають прямокутний перетин (60×8) мм², чотири прольоти, розташовані в одній площині і мають наступні параметри:

$$l = 1,0 \text{ м}; a = 0,6 \text{ м}; m = 0,972 \text{ кг/м}; E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \sigma_{доп} = 137,2 \text{ МПа.}$$

Згідно таблиці:

$$J = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,8 \cdot 6^3}{12} = 14,4 \text{ см}^2 = 14,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,8 \cdot 6^2}{6} = 4,8 \text{ см}^3 = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

Частота власних коливань:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 14,4 \cdot 10^{-8}}{0,972}} = 362 \text{ Гц,}$$

де $r_1 = 4,73$ відповідає розрахунковій схемі.

Відповідно до рис. коефіцієнт динамічного навантаження $\eta = 1,0$.

Максимальна напруга в шинах, знаходиться за формулою, рівно:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}^{(3)} l}{\lambda W} \eta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 1^2 \cdot 180^2 \cdot 0,88 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^6}{12 \cdot 0,6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6}} = 142,7 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Оскільки $\sigma_{max} = 142,7 \text{ МПа} > \sigma_{доп} = 137,2 \text{ МПа}$, то шини не задовольняють умові електродинамічної стійкості. Для зниження максимальної напруги в матеріалі шин необхідно зменшити довжину прольоту. Найбільша допустима довжина прольоту:

$$l_{доп} = l \sqrt{\frac{\sigma_{доп}}{\sigma_{max}}} = 1 \sqrt{\frac{137,2}{142,7}} = 0,98 \text{ м.}$$

Приймаємо довжину прольоту $l = 0,9 \text{ м}$.

У цьому випадку $f_1 = 447,9 \text{ Гц}$; $\eta = 1,0$:

$$\sigma_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 0,9^2 \cdot 180^2 \cdot 0,88 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^6}{12 \cdot 0,6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6}} = 115,6 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Максимальне навантаження на ізолятор у відповідності з формулою становить:

$$F_{max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} l (i_{уд}^{(3)})^2 K_{\phi} \cdot K_{расп} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{0,6} 0,9 \cdot 180^2 \cdot 10^6 \cdot 0,88 \cdot 1 = 7398 \text{ Н}$$

Вибираємо ізолятори типу ИОР-10-16,00 УХЛЗ. Вони задовольняють умові електродинамічної стійкості (9.12), тому що:

$$F_{доп} = 0,6 F_{разр} = 0,6 \cdot 16000 = 9600 \text{ Н} > F_{max}^{(3)} = 7398 \text{ Н}$$

Перевірка кабелю на термічну стійкість

Вибрати мінімальний переріз відповідного кабелю, що відповідає умові термічної стійкості при КЗ, якщо відомо, що при КЗ на шинах 10 кВ підстанції $I_{пс} = I_{пт} = 17 \text{ кА}$, $T_{а.ек} = 0,045 \text{ с}$, і розрахункова тривалість КЗ становить $t_{відкл} = 0,6 \text{ с}$.

Оскільки $t_{відкл} \geq 3T_{а.ек}$, то для визначення інтегралу Джоуля можна використовувати формулу:

$$B_k = I_{п.с}^2 (t_{відкл} + T_{a.ек}) = 17000^2 (0,6 + 0,045) = 186,4 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{c}$$

В відповідності з табл. для кабелів з алюмінієвими жилами

$C_T=90 \text{ A}\cdot\text{c}^{1/2}/\text{мм}^2$, тому мінімальний переріз жил кабелю, що відповідає умові термічної стійкості при КЗ, відповідно до формули становить:

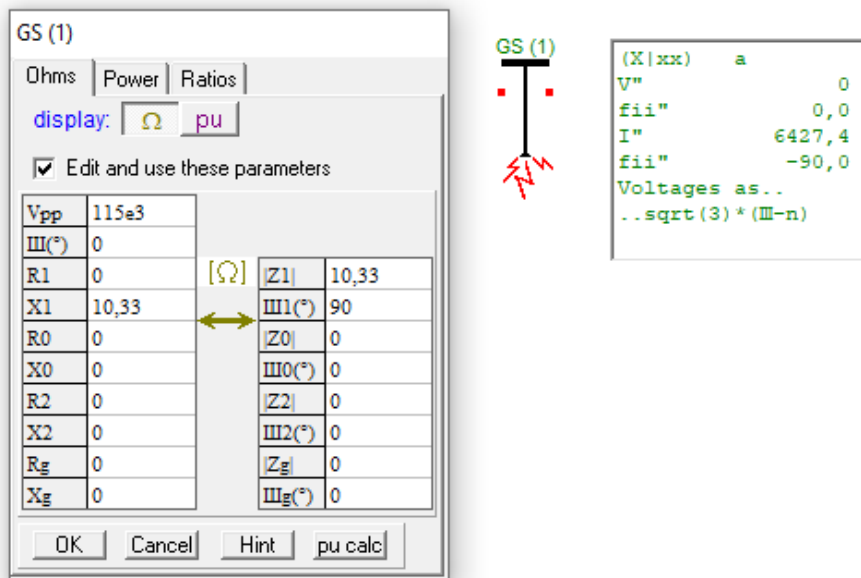
$$S_{\text{тер.мін}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{186,4 \cdot 10^6}}{90} = 151,7 \text{ мм}^2$$

Таким чином, необхідний кабель перетином 185 мм^2 .

4.8. Математичне моделювання електричної системи в Elplek

Математичне моделювання точки 1

Розрахунок в іменованих одиницях виміру з точним зведенням параметрів елементів



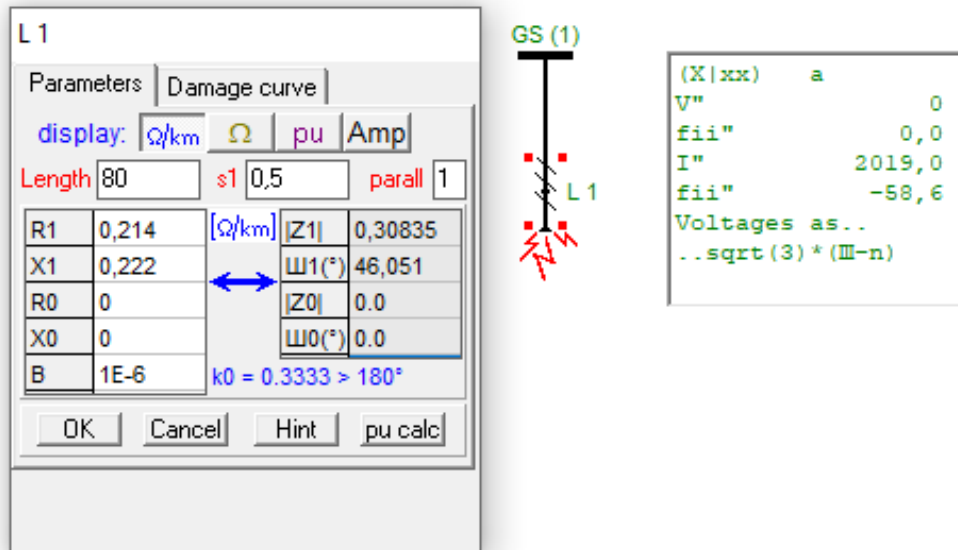
GS (1)	
Ohms	Power Ratios
display: Ω pu	
<input checked="" type="checkbox"/> Edit and use these parameters	
Vpp	115e3
III(°)	0
R1	0
X1	10,33
R0	0
X0	0
R2	0
X2	0
Rg	0
Xg	0
Z1	10,33
III1(°)	90
Z0	0
III0(°)	0
Z2	0
III2(°)	0
Zg	0
IIIg(°)	0

```

(X|xxx)  a
V''      0
fii''    0,0
I''      6427,4
fii''    -90,0
Voltages as..
..sqrt(3) * (III-n)
  
```

Математичне моделювання точки 2

Розрахунок в іменованих одиницях виміру з точним зведенням параметрів елементів



Математичне моделювання точки 3

Для того щоб задати параметри трансформатора Т2 потрібно розрахувати опори на його обмотках:

$$r_{T21} = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{НОМТ2}} \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{НОМТ2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 1.48 \text{ Ом}$$

$$r_{T22} = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{НОМТ2}} \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{НОМТ2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0.153 \text{ Ом}$$

$$r_{T23} = \frac{\Delta P}{2 \cdot S_{НОМТ2}} \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{НОМТ2}} = \frac{140000}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0.00445 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2B} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH}) \cdot \frac{U_{cp.158}^2}{S_{НОМТ2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (17.5 + 10.5 - 6.5) \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 56.86 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2C} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH}) \cdot \frac{U_{cp.37}^2}{S_{НОМТ2}}$$

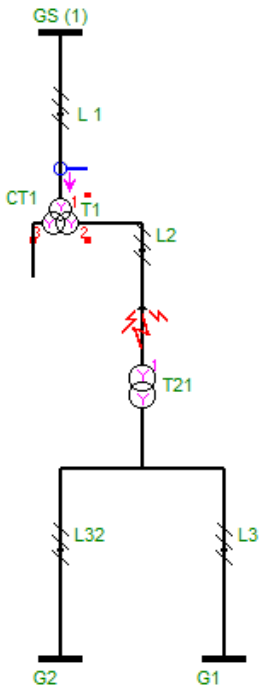
$$= \frac{0.5}{100} \cdot (6.5 + 10.5 - 17.5) \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0 \text{ Ом}$$

$$Z_{T2H} = \frac{0.5}{100} \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH}) \cdot \frac{U_{cp.6.3}^2}{S_{НОМТ2}}$$

$$= \frac{0.5}{100} \cdot (17.5 - 10.5 + 6.5) \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 35.7 \text{ Ом}$$

$$\begin{aligned}
X_B &= \sqrt{Z_{T2B}^2 - r_{T21}^2} = \sqrt{56.86^2 - 1.48^2} = 56.84 \text{ Ом} \\
X_C &= \sqrt{Z_{T2C}^2 - r_{T22}^2} = \sqrt{0^2 - 0.153^2} = 0 \text{ Ом} \\
X_H &= \sqrt{Z_{T2H}^2 - r_{T23}^2} = \sqrt{35.7^2 - 0.00445^2} = 35.7 \text{ Ом} \\
x_{12} &= X_B + X_C = 56.84 \text{ Ом} \\
x_{13} &= X_B + X_H = 56.84 + 35.7 = 92.54 \text{ Ом} \\
x_{23} &= X_C + X_H \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 0 + 35.7 \cdot \left(\frac{37 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 3.69 \text{ Ом} \\
Z_{T4} &= \frac{U_{KBH-HH} \cdot U_{cp.6,3}^2}{100 \cdot S_{НОМТ4}} = \frac{7.5 \cdot (37 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 10.27 \text{ Ом} \\
r_{T4} &= \frac{\Delta P}{S_{НОМТ4}} \cdot \frac{U_{cp.6,3}^2}{S_{НОМТ4}} = \frac{65000}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{(37 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 0.026 \text{ Ом} \\
X_{T4} &= \sqrt{Z_{T4B}^2 - r_{T4B}^2} = 10.26 \text{ Ом} \\
X_{GS\Gamma 1} &= X_d'' \cdot \frac{U_{cp.6,3}^2}{S_{НОМТ4}} = \frac{12.9}{100} \cdot \frac{(6.3 \cdot 10^3)^2}{\frac{25 \cdot 10^6}{0.8}} = 0.164 \text{ Ом}
\end{aligned}$$

Розрахунок в іменованих одиницях виміру з точним зведенням параметрів елементів



```
(X|xx)  a
v"      0
fii"    0,0
I"      3964,7
fii"    -80,9
Voltages as..
..sqrt(3) * (III-n)
```

T1		
AvΩ	PU	Z(%)
		A, V, Ohm
Vp	115e3	
Vs	37e3	
Vt	6,3e3	
X12	56,84	
X13	92,54	
X23 *	3,69	
R1	1,48	
R2	0,153	
R3	0,00445	
VAp	25e6	
VAs	25e6	
VAt	25e6	
type	YYY	YYD
phase shift		
Vs1	100	
Vs2	100	
Vs3	100	
Rg1	1e6	
Xg1	1e6	

OK Cancel Hint
Ampacity

T21			
AvΩ	PU	Z(%)	curve
			A, V, Ohm
V1	37e3		
V2	6,3e3		
X	10,26		
R	0,026		
Io1	0		
X0	0		
R0	0		
Rg1	0		
Xg1	1e6		
Rg2	0		
Xg2	1e6		
tap	0		
fx	0		
VAn	10e6		
Vs1	0		
Vs2	0		
tapmin	1		
tapmax	1		
parall	1		

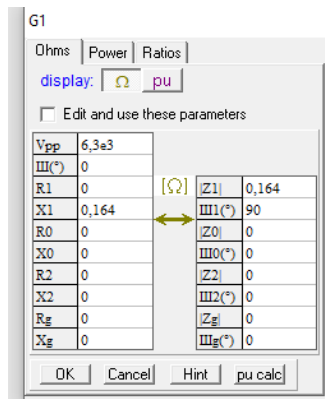
OK Cancel Hint
Ampacity

L2	
Parameters	Damage curve
display: Ω/km Ω pu Amp	
Length 1,6 s1 0,5 parall 3	
R1 0,153 [Ω/km]	Z1 0,25982
X1 0,21	∠Z1(°) 53,924
R0 0	Z0 0,0
X0 0	∠Z0(°) 0,0
B 1E-6	k0 = 0.3333 > -180°

OK Cancel Hint pu calc

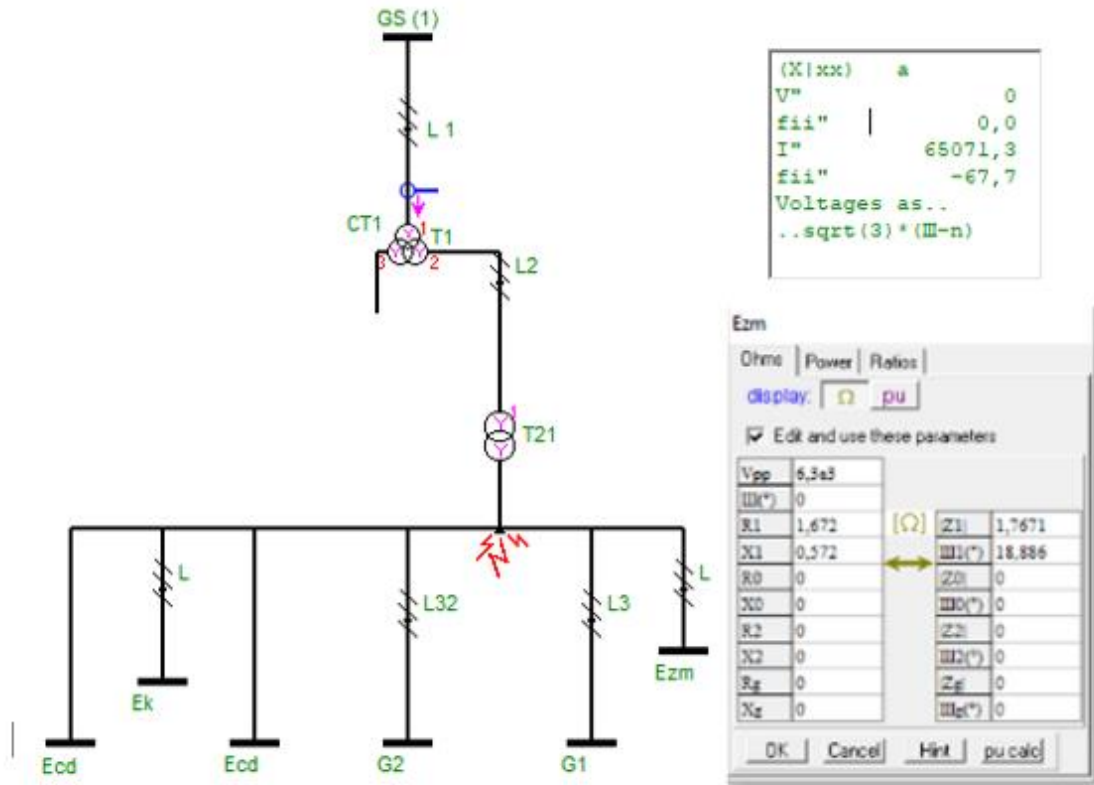
L3	
Parameters	Damage curve
display: Ω/km Ω pu Amp	
Length 1,7 s1 0,5 parall 2	
R1 0,02 [Ω/km]	Z1 0,02322
X1 0,0118	∠Z1(°) 30,541
R0 0	Z0 0,0
X0 0	∠Z0(°) 0,0
B 1E-6	k0 = 0.3333 > -180°

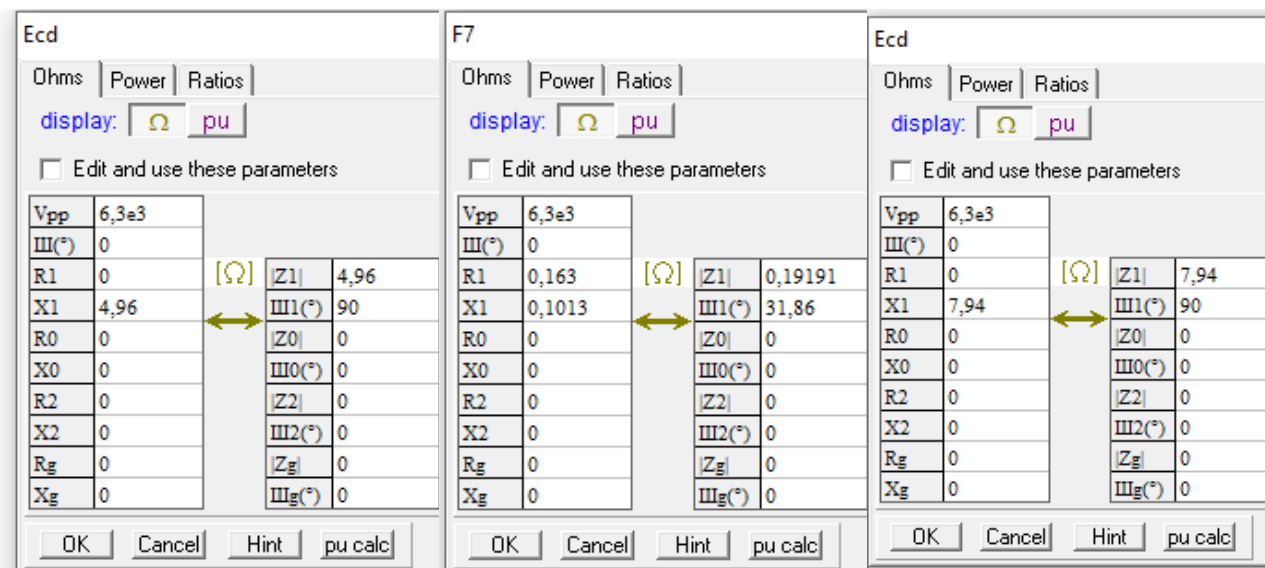
OK Cancel Hint pu calc



Математичне моделювання точки 4

Розрахунок в іменованих одиницях виміру з точним зведенням параметрів елементів





Таблиця 6.1 – Результати моделювання

Точка віддаленості	Струм трифазного К.З.		Скзмін	Скзмакс	іуд,
	Розрахункове	Модельоване			
	кА	кА	МВА	МВА	кА
1 точка	6.43	6.4274	1.28	3.63	18.205
2 точка	$2.01723 \cdot e^{-j58.5}$	$2.019 \cdot e^{-j58.6}$	0.402	0.671	$3.3665e^{-j58.5}$
3 точка	$4.0219 \cdot e^{-81}$	$3.965 \cdot e^{-j80.9}$	0.25765	0.59035	$9.2115 e^{-81}$
4 точка	$64.5665 \cdot e^{-67.8}$	$65.071 \cdot e^{-j67.7}$	0.7004	1.2975	$118.9 \cdot e^{-j68}$

4.9. Висновок

Для розрахунку трьохфазного струму короткого замикання завжди спочатку потрібно зробити схему заміщення. Розрахунки були проведені двома методами, а саме у відносних та іменованих одиницях. Результати в обох способах співпадають, незначна похибка могла бути за рахунок заокруглень. У курсовій роботі були проведені розрахунки точок КЗ спрощеним методом результати яких подані в таблиці 2.1, розрахунок

струмів К.З в мережі до 1 кВ,розрахунок струмів КЗ в різні проміжки часу ,розрахунок несиметричних К.З. ,струмів замикання на землю ,електродинамічну стійкість та термічна стійкість , розрахунок К.З в програмному середовищі «elplek» .Провели порівняння значень моделювання і розрахунків і зясували що значення мають незначну похибку,яка могла бути за рахунок заокруглень

Згідно розрахунків, можна зробити декілька висновків.

- Найбільше значення струму короткого замикання у 4 точці.
- Струм короткого замикання зменшується із збільшенням часу;
- Несиметричні струми короткого замикання були розраховані для трансформатора методом нульової послідовності;

При моделюванні К.З в різних точках значення струму К.З близькі до значень які були розраховані у відносних і іменованих одиницях

Схема та початкові дані

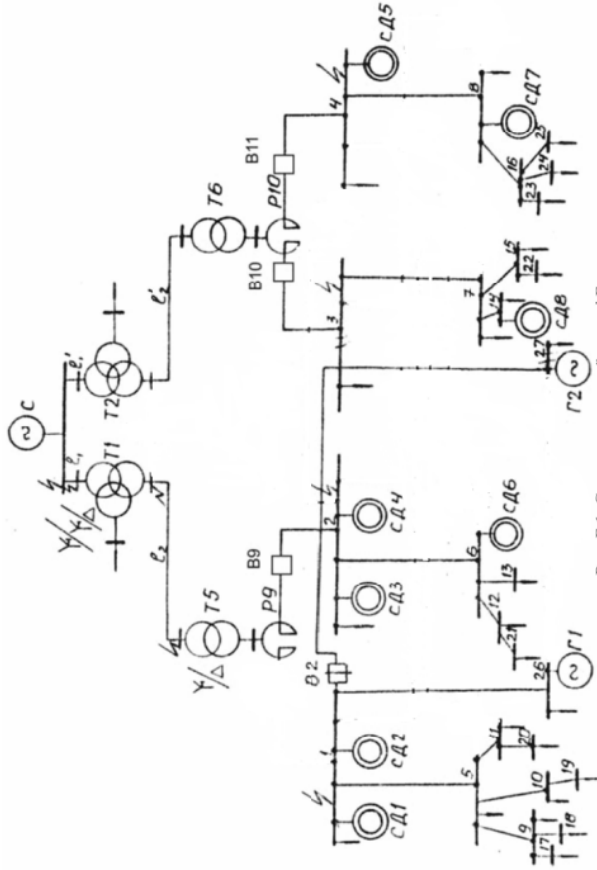


Рис. Б.1. Схема електричної мережі Б

В.2. Параметри генераторів

Генератори	Номер варіанта даних
R_{Σ}	8
MVA_{Σ}	2,5
U_{Σ}	6,3
$\cos \varphi_{\Sigma}$	0,8
x_{Σ}''	12,9

В.1. Параметри джерела системи

Складі завдань системи	Номер варіанта даних
I	8
$S_{Нест}$	320
x_c	0,25

В.5. Пошуковість навантажень

Навантаження, МВ·А	Номер варіанта даних
S1	1,3
S2	1,7
S3	0,25
S4	0,32
S5	0,26
S6	0,7
S7	0,5
S8	1,2
S9	1,4
S10	0,57
S11	0,84
S12	0,78
S13	0,52
S14	1,4
S15	0,3
S16	1,9
S17	1,1
S18	1,5
S19	0,8
S20	1,7
S21	0,9
S22	0,4
S23	0,8
S24	1,2
S25	0,5
S26	27,3
S27	25,0

В.3. Параметри трансформаторів

Трансформатори	Номер варіанта даних
S_{Σ} , МВ·А	25
U_{Σ} , кВ	115
$\cos \varphi_{\Sigma}$	38,5
R_{Σ} , МВ·А	6,6
U_{Σ} , кВ	25
$\cos \varphi_{\Sigma}$	115
R_{Σ} , МВ·А	38,5
U_{Σ} , кВ	10
$\cos \varphi_{\Sigma}$	38,5
R_{Σ} , МВ·А	6,6
U_{Σ} , кВ	10
$\cos \varphi_{\Sigma}$	6,3
R_{Σ} , МВ·А	10
U_{Σ} , кВ	38,5
$\cos \varphi_{\Sigma}$	38,5
R_{Σ} , МВ·А	6,6

В.6. Параметри лінії

Лінія	Номер варіанта даних
L1	8
L2	1,7
L3	0,5
L4	0,63
L5	1,2
L6	1,25
L7	0,9
L8	0,59
L9	0,63
L10	0,82
L11	1,5
L12	1,1
L13	1,2
L14	0,6
L15	0,44
L16	1,35
L17	0,73
L18	0,95
L19	0,16
L20	0,9
L21	1,34
L22	1,7
L23	1,5
L24	1,63
L25	1,65
L26	0,45

02.03-ДП. 1659 "С" 2020.11.02.006

Аналіз електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах промислового підприємства	Держ. 1	Маса	Масштаб
Вихідні дані	Держ. 1	Архив	1
Гай О.В.	Гай О.В.	Гай О.В.	Гай О.В.
Корольов В.В.	Корольов В.В.	Корольов В.В.	Корольов В.В.

Струми короткого замикання

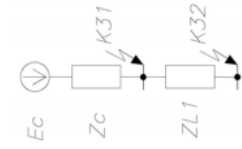
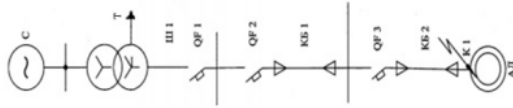


Схема для розрахунку КЗ в точках 1 та 2

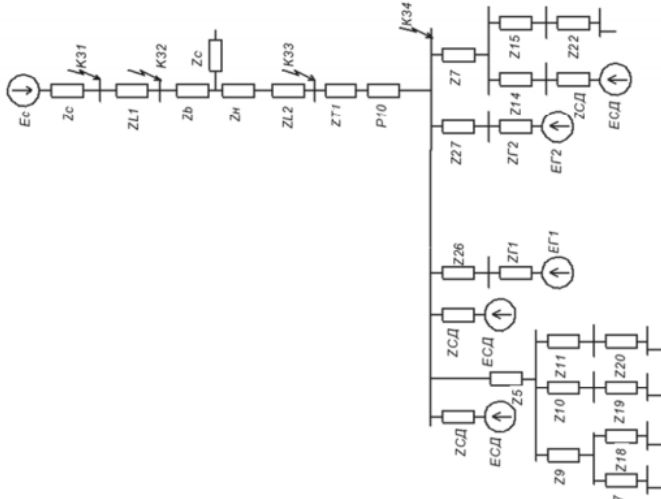


Схема для розрахунку КЗ в точці 3

Розрахунок струмів КЗ в мережі 1 кВ

Несиметричні короткі замикання

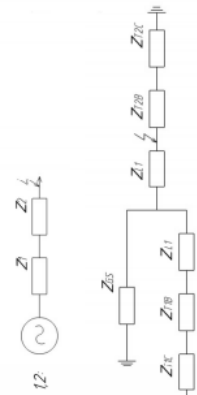
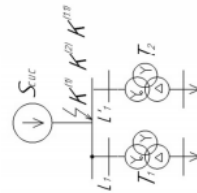


Схема для розрахунку несиметричних струмів КЗ для 1 та 2 точки

Схема замикання для блоку послідовностей

Значення струму кА
$I_N^1 = 1,96 \cdot e^{-j63,5}$
$I_N^2 = 1,755 \cdot e^{-j58,6}$
$I_N^{1+2} = 0,952 \cdot e^{-j66,13}$

Схема для розрахунку КЗ в точці 4

02.03-ДП. 1659 "С" 2020.11.02. 006	Лист	Місце	Розширення
Аналіз електромагнітних переходних процесів в електричних мережах промислового підприємства	Дата	Лист	№
Аналіз величини струмів КЗ в мережах до 1кВ та при несиметричних КЗ.	Архив	1	Архив
EEE-170026			

Схема та початкові дані

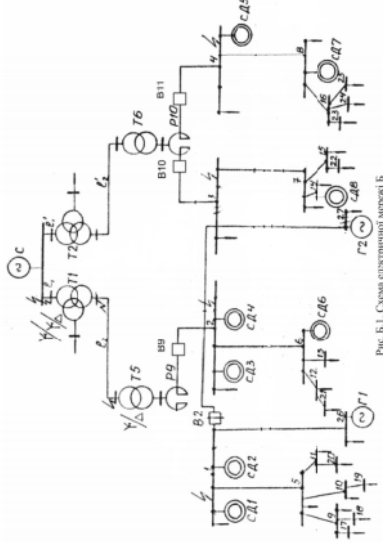


Рис. Б.1. Схема електричної мережі Б

В.1. Параметри ліній електропередачі

Секції ліній	№	Номер документа даних
1	5	6.25

В.2. Параметри спотворення

Спотворення	№	Номер документа даних
1	25	
2	25	
3	25	
4	25	
5	25	
6	25	
7	25	
8	25	
9	25	
10	25	
11	25	
12	25	
13	25	
14	25	
15	25	
16	25	
17	25	
18	25	
19	25	
20	25	
21	25	
22	25	
23	25	
24	25	
25	25	

В.3. Параметри трансформатора

Трансформатор	№	ТЗН	20000/110
1	25	25	20000/110
2	25	25	20000/110
3	25	25	20000/110
4	25	25	20000/110
5	25	25	20000/110
6	25	25	20000/110
7	25	25	20000/110
8	25	25	20000/110
9	25	25	20000/110
10	25	25	20000/110
11	25	25	20000/110
12	25	25	20000/110
13	25	25	20000/110
14	25	25	20000/110
15	25	25	20000/110
16	25	25	20000/110
17	25	25	20000/110
18	25	25	20000/110
19	25	25	20000/110
20	25	25	20000/110
21	25	25	20000/110
22	25	25	20000/110
23	25	25	20000/110
24	25	25	20000/110
25	25	25	20000/110

В.4. Параметри автотрансформатора

Автотрансформатор	№	Номер документа даних
1	25	25
2	25	25
3	25	25
4	25	25
5	25	25
6	25	25
7	25	25
8	25	25
9	25	25
10	25	25
11	25	25
12	25	25
13	25	25
14	25	25
15	25	25
16	25	25
17	25	25
18	25	25
19	25	25
20	25	25
21	25	25
22	25	25
23	25	25
24	25	25
25	25	25

Струми короткого замикання

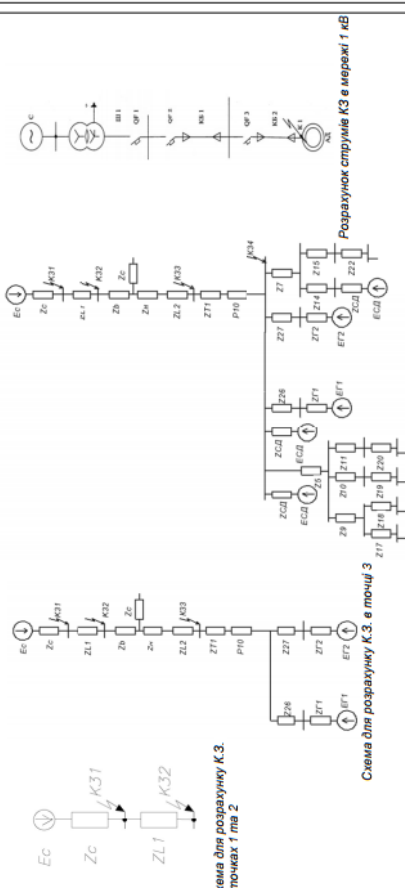


Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Точка	Розрахунок	Матриця	Модуль	Фаз
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4

Розрахунок струмів К.З. в "Eirlek"

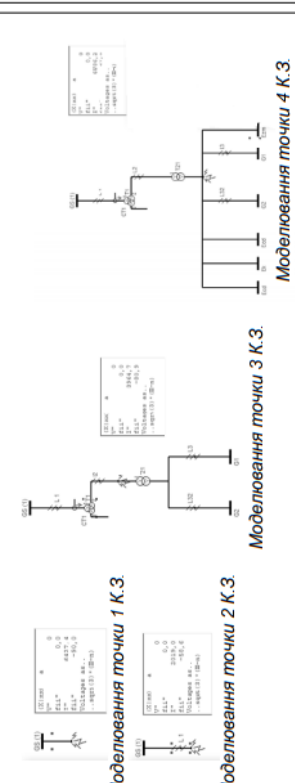


Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Точка	Розрахунок	Матриця	Модуль	Фаз
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4

Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Точка	Розрахунок	Матриця	Модуль	Фаз
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4

Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Точка	Розрахунок	Матриця	Модуль	Фаз
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4

Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Точка	Розрахунок	Матриця	Модуль	Фаз
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4

Схема для розрахунку К.З. в точці 4

Схема для розрахунку К.З. в точці 3

Схема для розрахунку К.З. в точках 1 та 2

Несиметричні короткі замикання



Схема для розрахунку несиметричних струмів К.З. для 1 та 2 точки

Схема заміщення для всіх послідовностей

Значення часу, f(c)	Y
$T_1=0.15$	$Y_1=0.65$
$T_2=0.33$	$Y_2=0.56$

Значення часу, f(c)	Y
$T_1=0$	64.5 e^{j12}
$T_1=0.15$	62.2 e^{j12}
$T_1=0.33$	61.3 e^{j12}

Струм трифазного К.З. у різній проміжок часу

Значення часу, f(c)	Y
$T_1=0$	64.5 e^{j12}
$T_1=0.15$	62.2 e^{j12}
$T_1=0.33$	61.3 e^{j12}

КР-11.05.2021-18ПЗ

Розрахунок струмів К.З.

Розрахунок струмів К.З. частини електричної мережі 110кВ

РОЗДІЛ 5

Приклад 2:

5.1. Реферат

Дана курсова робота є тренувальною для студентів спеціальності «Електричні системи й мережі». Вона спрямована на закріплення знань студентів за курсом «Електромагнітні перехідні процеси». Основною метою даної роботи є розрахунок різних типів коротких замикань, що включає в себе знаходження струму короткого замикання, ударного струму, потужності короткого замикання й інших параметрів.

Робота виконана на аркушах формату А4. У неї входять п'ять таблиць, двадцять п'ять ключових формул, по яких виробляється безпосередній розрахунок струмів коротких замикань й їхніх компонентів, п'ять малюнків, які складають уявлення про схеми заміщення ділянки мережі. Також у курсовий проект входять три креслення, на яких повинні бути намальовані, схема розрахункової мережі, схема її заміщення, і графік залежності струмів короткого замикання від заданої величини.

Ключові слова, які використовуються в курсовій роботі:

ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, СТРУМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, НЕСИМЕТРИЧНИЙ СТРУМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, УДАРНИЙ СТРУМ, ПРЯМА, ЗВОРОТНА, НУЛЬОВА ПОСЛІДОВНІСТЬ, ГЕНЕРАТОРИ, ТРАНСФОРМАТОРИ, ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, СИНХРОННІ ДВИГУНИ, РЕАКТОРИ, ПОТУЖНІСТЬ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, ВІДНОСНІ ОДИНИЦІ, ИМЕНОВАНЬЕ ОДИНИЦІ.

5.2. Вступ

Перехідні процеси в електричних системах є наслідком зміни режимів, обумовлених експлуатаційними умовами, або результатом ушкодження ізоляції й струмоведучих частин електроустановок.

Причинами виникнення перехідних процесів можуть бути численні впливи на елементи системи:

- включення, відключення й перемикання джерел електричної енергії, трансформаторів, ЛЕП, електроприймачів й інших елементів;
- поява несиметрії струмів і напруг у результаті відключення окремих фаз, несиметричних змін навантаження, обривів фаз і т.д.
- форсування порушення синхронних машин і гасіння їхнього магнітного поля;
- раптові стрибки й падіння навантаження;
- атмосферно - кліматичні впливи на елементи електричної системи;
- повторні включення й відключення короткозамкнених ланцюгів;
- синхронний пуск двигунів і синхронних компенсаторів.

Невід'ємною частиною перехідних процесів, є короткі замикання в елементах системи. Вони і є однією з основних причин порушення нормального режиму роботи окремих електроустановок і системи в цілому.

Короткі замикання являють собою всяким випадковим або навмисне, не передбачене нормальним режимом роботи, електричне з'єднання різних точок електроустановки між собою або землею.

У місці короткого замикання може з'являтися електрична дуга з перехідним опором, що при порівняно більших струмах КЗ є практично активним і незмінним.

В інженерній практиці розрахунки струмів КЗ в електричних системах виконуються з метою:

- вибору уставок пристроїв релейного захисту й автоматики, їхні налагодження й перевірки поводження в аварійних ситуаціях, пов'язаних з короткими замиканнями;

- перевірки електричних апаратів - вимикачів, роз'єднувачів, короткозамикачів і т.д. - на термічну й динамічну стійкість при струмах КЗ;

- визначення місця ушкодження на повітряних лініях електропередачі (дистанційні методи ОМП);

- вибору й перевірки пристроїв грозозахисту й зв'язки.

Широке застосування обчислювальної техніки (ЕОМ) дає можливість підвищити точність розрахунків струмів КЗ, в основному, за рахунок введення уточнених параметрів ліній електропередачі, трансформаторів й автотрансформаторів, за рахунок можливості обліку цілого ряду факторів, які мають місце в процесі КЗ й які не могли бути враховані при колишніх практичних методах розрахунків. До таких факторів ставляться:

- складні випадки взаємоіндукції на ділянках паралельного проходження повітряних ліній електропередачі, вплив ємнісної провідності довгих ліній електропередачі ($L > 150$ км) напругою 300-750 кв.

- складні ушкодження, що виникають у процесі КЗ, - перехід одного виду КЗ в інший, що супроводжується неповнофазними режимами, а також одночасні КЗ у декількох точках мережі.

Крім того, використання ЕОМ дозволяє швидко виконувати серійні однотипні розрахунки струмів КЗ у розподільних мережах 0,4-6-10 кв, що значно скорочує час розрахунків.

Дослідження й розрахунки струмів короткого замикання є однією з необхідних умов рішення багатьох завдань, що виникають при проектуванні й експлуатації систем електропостачання. Ці завдання пов'язані з дослідженням електромагнітних перехідних процесів, вибором принципів дії

й настроювання автоматичних пристроїв протиаварійного керування, аналізом електромеханічних перехідних процесів з метою визначення умов стійкості електричного навантаження систем і розробки заходів для забезпечення безперервності роботи промислових підприємств у різних режимах системи електропостачання.

5.3. Завдання на курсову роботу

Для розрахунку струмів трифазного й несиметричного КЗ запропоновані схеми (згідно варіанта). Вихідні параметри для розрахунку наведені в табл. П.3.1-П.3.7, по яких з довідкової літератури вибираються конкретні типи елементів схеми й виписуються їхні паспортні дані, необхідні для розрахунків і побудови розрахункової схеми. Розрахункові криві показані на рис. П.4.1-П.4.4.

Для всіх точок короткого замикання (відповідно до завдання) розрахувати:

- 1.1. Значення струмів короткого замикання.
- 1.2. Величину ударного струму.
- 1.3. Потужність короткого замикання.
- 1.4. Сталий струм короткого замикання.
- 1.5. Розрахувати значення струму короткого замикання з урахуванням двигунів і змішаного навантаження, у момент короткого замикання й через n -секунд після нього (по загальному, або індивідуальному зміни). Відповідно до варіанта.
 - 2.1. Розрахувати значення несиметричних струмів короткого замикання (відповідно до варіанта).
 - 2.2. Оцінити значення струмів замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю.
 - 3.1. Розрахувати струм короткого замикання в мережі до 1 кв (вибір опору джерела прийняти аналогічно вибору джерела харчування використовуваної при аналізі високовольтних мереж)
 - 3.2. Потужність короткого замикання.
 - 4.1. Побудувати графічні залежності розподілу величини струму к.з. у функціональній залежності від відстані між місцем короткого замикання й джерелом електричної енергії.
 - 4.2. Провести математичне моделювання, електричної системи, зрівняти отримані результати.

5. Розрахувати й зрівняти струми в точці зазначеній викладачем, з обліком всі можливих факторів, для різних схем нормального режиму.

6. Розрахунок роботи в іменованих і відносних одиницях

Таблиця 1- загальні дані

№	Сх.	Відкл.	Задан ий. сист.	до 1кв	Тип наванта ження в мережі до 1кв	№ вар.	T1	T2	K ⁽¹⁾ ізолюв. нейтраль
16	Б	1,12,3,4,5,6,7,8	1	7	СМ	8	1	034	8

5. Параметри елементів схеми.

Таблиця 2-параметри живильної системи

Спосіб завдання системи	S _н сист	X _с
1	320	0,25

Примітки: 1. Реактивний опір системи заданий у відносних одиницях і наведено до номінальних параметрів системи. 2. При завданні системи I і II способами за базисну потужність прийняти номінальну потужність системи.

Таблиця 3 - Параметри генераторів

Генератори	P _н , МВт	U, кВ	cos φ	X'' _d
Г1,Г1	25	6,3	0,8	12,9

Примітки: 1. Опори генераторів дані у відсотках і наведені до їхніх номінальних параметрів. 2. У складі генератора є АРВ.

Таблиця 4 - Параметри трансформаторів

Трансформа- тори	S _н , МВ*А	U _н , Кв		
		ВН	СН	НН
T1	25	115	38,5	6,6
T2	25	115	38,5	6,6
T5	10	38,5	—	6,3
T6	10	38,5	—	6,3
T3	1,6	6	—	0,4

Таблиця 5 - Параметри синхронних двигунів

Синхронні двигуни	P _н , МВт	U _н , кВ
СД1	1,6	6,0

СД2	1,0	6,0
СД3	1,0	6,0
СД4	1,25	6,0
СД5	1,6	6,0
СД6	1,25	6,0
СД7	1,0	6,0
СД8	1,0	6,0

Примітки: 1. Синхронні двигуни СД1-СД6 комплектуються АР.
2. Уважати, що всі СД до КЗ працювали з повним номінальним навантаженням при номінальних коефіцієнтах потужності й напрузі на затискачах.

Таблиця 6 - Параметри ліній

Лінія	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
Довжина км	80	1,7	0,50	0,63	0,55	1,25	0,9	0,59	0,63	0,82	1,5	1,2	0,63

L14	L15	L16	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	L24	L25	L26
1,1	1,2	0,6	0,44	1,35	0,73	0,95	0,46	0,9	1,34	1,7	1,5	0,05

Примітки: 1. Лінії L1 й L2 - повітряні, інші - кабельні. 2. Довжина ліній задана в кілометрах.

Таблиця 7 - Параметри реакторів

Реактори	U _н , кв	I _н , кА	X _p , Ом	X _{p0,5} , Ом
P9	6,0	2x0,6	1,01	0,346
P10	6,0	2x0,6	1,0	0,346

Примітки: 1. P9 і P10 - здвоєні реактори. 2. X_p і X_{p0,5} - індуктивні опори відповідно реактора при рівних й однаково спрямованих струмах в обох гілках й однієї гілки при відсутності струму в іншій.

Таблиця 8 – Потужність навантажень

Навантаження	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
Мв*А	1,3	1,7	0,25	0,32	0,26	0,7	0,5	1,2	1,4	0,57	0,84	0,78	0,52	1,4

S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27
0,3	1,9	1,1	1,5	0,8	1,7	0,9	0,4	0,8	1,2	0,5	27,3	25,0

Примітки: 1. Навантаження (S_i) являє собою асинхронне навантаження, підключене безпосередньо до шин i-го вузла. 2. На шинах 5', 6', 7', 8'/схеми А и Б/ умовно немає навантаження.

Відсутні дані трансформаторів (тип, довідникові дані, розрахункові дані) вибираємо з довідників, наприклад з довідника за редакцією Файбисовича.

Таблиця 9 – Параметри трансформаторів: Т1, Т2

Тип	S _{ном} , МВ*А	Каталожні дані								
		U _{ном.обмоток} , кВ			U _x , %			ΔP _к , кВт	ΔP _x , кВт	I _x , %
ТДТН-25000/110	25	ВН	СН	НН	3	В-Н	С-Н	140	31	0,7
		115	38,5	6,6	10,5	17,5	6,5			

Розрахункові дані						
R _r , Ом			X _r , Ом			Q _x , кВАР
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
1,5	1,5	1,5	56,9	0	35,7	175

Таблиця 10- Параметри трансформаторів: Т5, Т6

Тип	S _{ном} , МВ*А	Каталожні дані					Розрахункові дані			
		U _{ном.обмоток} , кВ	U _x , %	ΔP _к , кВт	ΔP _x , кВт	I _x , %	R _r , Ом	X _r , Ом	Q _x , кВАР	
ТД-10000/35	10	ВН	НН	7,5	65	14,5	0,8	0,96	11,1	80
		38,5	6,3							

Таблиця 11- Параметри трансформатора Т3

Тип	S _{ном} , МВ*А	Довідникові дані					Розрахункові дані			
		U _{ном.обмоток} , кВ	U _x , %	ΔP _к , кВт	ΔP _x , кВт	I _x , %	R _r , Ом	X _r , Ом	Q _x , кВАР	
ТД-1600/6	1,6	ВН	НН	5,5	18	3,3	1,3	—	—	—
		6	0,4							

Таблиця 12 – Параметри реакторів

Реактори	Тип	S _н , МВ*А	U _н , кВ	I _н , кА	X _p , Ом	X _{p0,5} , Ом
Р9	РБС	21,6	6,0	2x0,6	1,01	0,346
Р10	РБС	21,6	6,0	2x0,6	1,0	0,346

Підберемо й розрахуємо опори всіх елементів мережі у відносних й іменованих одиницях і для зручності розрахунку занесемо ці дані в таблиці

5.4. Підбір параметрів мережі

Розрахунок опорів ліній.

Значення питомого індуктивного й питомого активного опору повітряних ліній варто приймати по довідникових таблицях, виходячи з матеріалу й перетину проводів і середньої геометричної відстані між фазами.

Для початку розрахуємо припустимий тривалий струм який може протікати в лінії. Формула для обчислення струму виглядає так:

$$I = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} \quad (5.1)$$

Потужність передана лінією виберемо по максимальній потужності трансформатора Т1: $S_{\text{ном}}=25\text{МВА}$

$$I_{\text{л1}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 125,5\text{А} \quad (5.2)$$

По цьому струмі з ПУЭ (Правила Устройств Электроустановок) вибираємо перетин і марку проведення по нагріванню (провідники будь-якого призначення повинні задовольняти вимогам відносно гранично припустимого нагрівання з обліком не тільки нормальних, але й післяаварійних режимів, а також режимів у період ремонту й можливих нерівномірностей розподілу струмів між лініями, секціями шин і т.п.).

Вибираємо розрахункові характеристики проводів з довідників, для лінії L1: АС-25, $r_0 = 1.18 \text{ Ом/км}$, $d=6.9\text{мм}$, $x_0=0.45 \text{ Ом/км}$.

X_0 розраховується тільки в повітряних лініях (Якщо відсутні дані про перетини проводів, припустимий питомий індуктивний опір прямої послідовності повітряних ліній напругою до 220 кВ приймають рівним 0,4 Ом/км, ліній напругою 330 кВ - рівним 0,325 Ом/км і ліній напругою 500 кВ - рівним 0,307 Ом/км.), а в кабельних цей параметр береться з довідників.

Приклад розрахунку:

$$X_0 = 0,144 \lg \frac{2 \cdot D_{\text{ср}}}{d} + 0,016 = 0,144 \lg \frac{2 \cdot 4}{6,9 \cdot 10^{-3}} + 0,016 = 0,45 \text{ Ом/км} \quad (5.3)$$

де,

$D_{\text{ср}}$ – середньгеометрична відстань між проводами (береться з довідкових даних для даного класу напруг).

d – діаметр проведення.

Далі розраховуємо опір лінії.

В іменованих одиницях:

$$X_{\text{л1}} = X_0 \cdot l = 0,45 \cdot 80 = 36 \text{ Ом} \quad (5.4)$$

$$R_{\text{л1}} = R_0 \cdot l = 1,18 \cdot 80 = 94,4 \text{ Ом} \quad (5.5)$$

У відносних одиницях:

$$r_{\text{л1}*} = r_0 \cdot \frac{S_0}{U_{\text{ном}}^2} = 94,4 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{115^2 \cdot 10^6} = 2,284 \text{ (о. е.)}; \quad (5.6)$$

$$X_{\text{л1}*} = X_0 \cdot \frac{S_0}{U_{\text{ном}}^2} = 36 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^6} = 0,871 \text{ (о. е.)} \quad (5.7)$$

Інші лінії розраховуємо в такий же спосіб, з урахуванням деякої специфіки, і результати записуємо у зведену таблицю - 1.12.

► Лінія L3, L24, L25, L26 складаються із кількох паралельно з'єднаних провідників, тому їхній сумарний опір розраховується відповідно.

► Повітряні лінії Л1 і Л1* мають рівну довжину й приєднані до трансформаторів однакової потужності, тобто значення опорів цих ліній будуть однаковими.

Таблиця 13 - Параметри ліній в іменованих і відносних одиницях наведені до основного щабля напруги

Лінія	I_p, A	Марка проводу	$I_{\text{доп}}, A$	$r_0, \text{Ом/км}$	$X_0, \text{Ом/км}$	$R_{\text{л}}, \text{Ом}$	$X_{\text{л}}, \text{Ом}$	$R_{\text{л}*}$	$X_{\text{л}*}$
L1, L1*	125,5	АС-25	142	1,18	0,45	94,4	36	2,284	0,871
L2, L2*	150	АС-35	175	0,79	0,415	1,34	0,706	0,313	0,165
L3	748,9	2×КЛ-150	2×390	2×0,12	2×0,079	0,06	0,039	0,242	0,16
L4	380,4	КЛ-150	390	0,12	0,079	0,076	0,050	0,613	0,403
L5	330	КЛ-150	390	0,12	0,079	0,066	0,044	0,532	0,355
L6	320,8	КЛ-150	390	0,12	0,079	0,15	0,099	1,209	0,798

L7	367	КЛ-150	390	0,12	0,079	0,11	0,071	0,887	0,572
L8	126	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,151	0,051	1,217	0,411
L9	232,8	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,161	0,054	1,298	0,435
L10	146,7	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,21	0,071	1,693	0,572
L11	137,5	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,384	0,129	3,096	1,04
L12	73,3	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,307	0,103	2,475	0,83
L13	155,8	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,161	0,054	1,298	0,435
L14	154	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,282	0,095	2,273	0,766
L15	47,7	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,307	0,103	2,475	0,83
L16	82,5	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,154	0,052	1,242	0,419
L17	220	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,113	0,038	0,911	0,306
L18	64,2	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,346	0,116	2,789	0,935
L19	36,7	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,187	0,063	1,508	0,508
L20	229,1	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,24	0,082	1,935	0,661
L21	73,3	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,118	0,040	0,951	0,323
L22	110	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,23	0,077	1,854	0,621
L23	45,8	КЛ-70	245	0,256	0,086	0,343	0,115	2,765	0,927
L24	2502	5×КЛ-240	5×510	5×0,77	5×0,071	0,262	0,024	2,11	0,194
L25	2292	5×КЛ-240	5×510	5×0,77	5×0,071	0,231	0,021	1,717	0,169
L26	1587	5×КЛ-185	5×345	5×0,10	5×0,073	0,97	0,73	0,86	0,65

Марку кабелю для всіх кабельних ліній виберемо - ААШв.

Идоп – Припустимий тривалий струм на провідники, кабелі й шинопроводи.

I_p – розрахунковий струм навантаження.

Виберемо розрахункові характеристики проводів з довідника за редакцією Алієва.

Розрахуємо опір трансформаторів

Розрахуємо опір трансформаторів в іменованих одиницях з наближеним приведенням параметрів.

Трансформатори Т1 і Т2:

$T_1 = T_2$ (за заданим даними).

Сумарний активний опір, в іменованих одиницях при номінальних умовах цього трансформатора, варто визначати за формулою:

$$R_B = R_C = R_H = \frac{\Delta P_k}{2S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{140 \cdot 10^3}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 1,481 \text{ Ом}$$

(5.8)

де ΔP_k - втрати короткого замикання, кВт;

$S_{\text{НОМ}}$ - номінальна потужність трансформатора, МВ·А.

Втрати холостого ходу трансформатора варто визначати за формулами:

$$U_B = \frac{1}{2} \cdot (U_{B-H} + U_{B-C} - U_{H-C}) = \frac{1}{2} \cdot (17,5 + 10,5 - 6,5) = 10,75 \% \quad (5.9)$$

$$U_C = \frac{1}{2} \cdot (U_{B-C} + U_{H-C} - U_{B-H}) = \frac{1}{2} \cdot (10,5 + 6,5 - 17,5) = -0,25 \% \quad (5.10)$$

$$U_H = \frac{1}{2} \cdot (U_{B-H} + U_{C-H} - U_{B-C}) = \frac{1}{2} \cdot (17,5 + 6,5 - 10,5) = 6,75 \% \quad (5.11)$$

$$Z_B = \frac{U_B}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 56,848 \text{ Ом}; \quad (5.12)$$

$$Z_C = \frac{U_C}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{-0,25}{100} \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = -1,32 \text{ Ом}, \quad (5.13)$$

(Опір не може бути негативним, тому прийmemo Z_C рівним нулю).

$$Z_H = \frac{U_H}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 35,677 \text{ Ом} \quad (5.14)$$

Формули взяті з [7, стор.34].

У цьому випадку $Z_B, Z_C, Z_H \gg R_B, R_C, R_H$, тому можна прийняти: $Z_B = X_B, Z_C = X_C, Z_H = X_H$.

ПРИКЛАД: $X_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2} = \sqrt{56,848^2 - 1,481^2} = 56,829 = Z_B \text{ Ом}$

Розрахуємо трансформатори Т5 і Т6.

Т5=Т6 (за заданим даними)

$$R_T = \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{65 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{(38,5 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 0,889 \text{ Ом};$$

$$Z_T = \frac{U_X}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{(38,5 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = 10,228 \text{ Ом};$$

$$Z_T \gg R_T \Rightarrow Z_T = X_T .$$

Розрахуємо трансформатор Т3

$$R_T = \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{18 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{1,6 \cdot 10^6} = 0,279 \text{ Ом};$$

$$X_T = \frac{U_X}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{1,6 \cdot 10^6} = 1,364 \text{ Ом};$$

$$Z_T \gg R_T \Rightarrow Z_T = X_T .$$

Розрахуємо опір трансформаторів у відносних одиницях з наближеним приведенням параметрів. За базисну потужність візьмемо потужність системи $S_6 = 320 \cdot 10^6$ МВА

Трансформатори Т1 і Т2:

$$R_{B*} = R_{C*} = R_{H*} = \frac{\Delta P_K}{2S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{140 \cdot 10^3}{2 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0,0358 \text{ (в. о.)}; \quad (5.15)$$

$$Z_{B*} = \frac{U_B}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 1,376 \text{ (в. о.)}; \quad (5.16)$$

$$Z_{c*} = \frac{U_c}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{-0,25}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = -0,032, Z_{c*} = 0 \text{ (в. о.)}; \quad (5.17)$$

$$Z_{H*} = \frac{U_H}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0,863 \text{ (в. о.)} \quad (5.18)$$

Формули взяті з довідника [6, стор.91].

$Z_{B*}, Z_{c*}, Z_{H*} \gg R_{B*}, R_{c*}, R_{H*}$, тому можна прийняти $Z_{B*} = X_{B*}, Z_{c*} = X_{c*}, Z_{H*} = X_{H*}$.

Трансформатори Т5 і Т6:

$$R_{T*} = \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{65 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 0,208 \text{ (в. о.)}$$

$$X_{T*} = \frac{U_X}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 2,391 \text{ (в. о.)} \quad (5.19)$$

$$Z_{T*} \gg R_{T*} \Rightarrow Z_{T*} = X_{T*}$$

Трансформатор- Т3:

$$R_{T*} = \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{18 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^6} = 2,25 \text{ (в. о.)}$$

$$X_{T*} = \frac{U_X}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^6} = 11 \text{ (в. о.)}$$

$$Z_{T*} \gg R_{T*} \Rightarrow Z_{T*} = X_{T*}$$

Розрахуємо опір і надперехідну ЕРС двигунів у відносних й іменованих одиницях з наближеним приведенням параметрів.

Знайдемо значення надперехідних ЕРС синхронних двигунів.

Для СД7:

$$I_a = \frac{P_H}{U} = \frac{10^6}{6,3 \cdot 10^3} = 158,73 \text{ А}; \quad (5.20)$$

$$I_p = \frac{\sqrt{1,16^2 - 1} \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^3} = 93,31, \text{ А};$$

$$X_d = X_d \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,2 \cdot \frac{6,3}{1,16} = 6,84 \text{ Ом}; \quad (5.21)$$

$$E''_g = \sqrt{(6,3 \cdot 10^3 + 93,31 \cdot 6,84)^2 + (158,73 \cdot 6,84)^2} = 7,02 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$E_{g*} = \frac{E''_g}{U_H} = \frac{7,02 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 1,115 \text{ (о. е)} \quad (5.22)$$

X''_d – береться з довідкової літератури [1, стор. 154].

Опір для двигунів сд1,сд5.

В іменованих одиницях:

$$X_d = X''_d \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^6}{1,85 \cdot 10^6} = 4,29 \text{ Ом} \quad (5.23)$$

У відносних одиницях:

$$X_{d*} = X''_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,2 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{1,85 \cdot 10^6} = 34,59 \text{ (в. о.)} \quad (5.24)$$

Інші двигуни розраховуються за таким самим принципом.

Таблиця 14 – параметри синхронних двигунів

Синхронні двигуни	Тип	S _{НОМ} , МВ	
		А	X'' _{d*}
СД1	СТД-1600-2 УХЛЧ	1,85	0,2
СД2	СТД-1000-2 УХЛЧ	1,16	0,2
СД3	СТД-1000-2 УХЛЧ	1,16	0,2
СД4	СТД-1250-2 УХЛЧ	1,45	0,2
СД5	СТД-1600-2 УХЛЧ	1,85	0,2
СД6	СТД-1250-2 УХЛЧ	1,45	0,2

СД7	СТД-1000-2 УХЛЧ	1,16	0,2
СД8	СТД-1000-2 УХЛЧ	1,16	0,2

Розрахунок системи.

В іменованих одиницях:

$$X_c = X''_d \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{н.з}}} = 0,25 \cdot \frac{115^2}{320} = 10,33 \text{ (Ом)}$$

У відносних одиницях:

$$X_{c*} = X''_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = 0,25 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{320 \cdot 10^6} = 0,25 \text{ (в. о.)}$$

Розрахунок реакторів.

Так як ми розраховуємо опори за допомогою наближеного методу, те активної складового опору реактора можемо зневажити.

Індуктивний опір розраховують по таких формулах:

$$X_{1*} = X_{2*} = \frac{(1 + K_{з.в}) \cdot X_{\text{ном}} \cdot I_6 \cdot U_{\text{р.ном}}}{100 \cdot I_{\text{р.ном}} \cdot U_6} = \frac{(1 + K_{з.в}) \cdot X_{\text{ном}} \cdot S_6 \cdot U_{\text{р.ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{\text{р.ном}} \cdot U_6^2} \quad (5.25)$$

$$X_{3*} = - \frac{K_{з.в} \cdot X_{\text{ном}} \cdot I_6 \cdot U_{\text{р.ном}}}{100 \cdot I_{\text{р.ном}} \cdot U_6} = - \frac{1 + K_{з.в} \cdot X_{\text{ном}} \cdot S_6 \cdot U_{\text{р.ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{\text{р.ном}} \cdot U_6^2} \quad (5.26)$$

$$X_{9,1*} = X_{9,2*} = \frac{(1 + 0,5) \cdot 1,01 \cdot 320 \cdot 10^6 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 630 \cdot U_6^2 \cdot 100} = \frac{27989941}{U_6^2} \text{ (в. о.)}$$

$$X_1 = X_2 = \frac{(1 + K_{з.в}) \cdot X_{\text{ном}} \cdot U_{\text{р.ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{\text{р.ном}}}$$

$$X_3 = - \frac{K_{з.в} \cdot X_{\text{ном}} \cdot U_{\text{р.ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{\text{р.ном}}}$$

$$X_1 = X_2 = \frac{(1 + 0,5) \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 630} = 0,087$$

$$X_3 = - \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 630} = -0,029$$

$$X_{9,3*} = - \frac{0,5 \cdot 1,01 \cdot 320 \cdot 10^6 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 630 \cdot U_6^2 \cdot 100} = - \frac{9329980}{U_6^2} \text{ (в. о.)}$$

$$X_{9,1} = X_{9,2} = \frac{27989941}{U_6^2} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} = \frac{27989941}{U_6^2} \cdot \frac{6,3^2}{21,6} = \frac{51431516}{U_6^2} \text{ (Ом)}$$

$$X_{9,3} = - \frac{9329980}{U_6^2} \cdot \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} = - \frac{17143838}{U_6^2} \text{ (Ом)}$$

Опір іншого реактора розраховуємо аналогічно, і отримані дані заносимо в таблицю-15

Таблиця 15 - опору реакторів у відносних й іменованих одиницях

Реактори	$X_{p1,2}, \text{ Ом}$	$X_{p3}, \text{ Ом}$	$X_{p*1,2}$	X_{p*3}
P9	0,087	-0,029	$\frac{27989941}{U_6^2}$	$-\frac{9329980}{U_6^2}$
P10	0,087	-0,029	$\frac{27712812}{U_6^2}$	$-\frac{9237604}{U_6^2}$

U_6 - базисна напруга розраховує точки, що, короткого замикання.

Розрахунок генераторів Г1 і Г2.

В іменованих одиницях:

$$X_{d1} = X_{d2} = X_d = X''_d \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = 0,129 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^6}{31,25 \cdot 10^6} = 0,164 \text{ Ом}$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_n}{\cos \alpha} = \frac{25 \cdot 10^6}{0,8} = 31,25 \cdot 10^6 \text{ В*А} \quad (5.27)$$

$$E''_{g1} = E''_{g2} = E''_g = \sqrt{(U \mp I_p \cdot X_d)^2 + I_a^2 \cdot X_d^2} - \text{над перехідні ЕРС генераторів.}$$

Де знак “-“ вказує, що це режим недзбудження, а знак “+“ - режим переперебудження. У нашому випадку режим роботи генераторів приймаємо перебудженням.

$$I_a = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot U_i} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2291,073 \quad (5.28)$$

$$I_p = \frac{\sqrt{S_n^2 - P_n^2}}{U_n} = \frac{\sqrt{(31,25 \cdot 10^6)^2 - (25 \cdot 10^6)^2}}{6,3 \cdot 10^3} = 2976,19 \text{ А} \quad (5.29)$$

$$E''_g = \sqrt{(6,3 \cdot 10^3 + 2976,19 \cdot 0,164)^2 + 2291,073^2 \cdot 0,164^2} = 6,799 \cdot 10^3$$

У відносних одиницях:

$$X_{d1*} = X_{d2*} = X_{d*} = X''_{d*} \cdot \frac{S_6}{S_n} = 0,129 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{31,25 \cdot 10^6} = 1,321$$

$$E''_{*g1} = E''_{*g2} = E''_{*g} = \frac{E''_g}{U_{\text{н}}} = \frac{6,799 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 1,079$$

$$E_{c*} = \frac{E_c}{U_{\text{ном}}} = \frac{115 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} = 1$$

Розрахунок навантаження:

Знайдемо над перехідну ЕРС навантаження. Оскільки навантаженням є АД, то будемо використати наступну формулу ([3] с.47):

$$E''_n = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi - I \cdot X'')^2}, \quad (5.30)$$

де $\cos\varphi_* = 0,9$, а $X''_* = 0,18$ ([1], с. 35).

Підставимо значення:

$$E''_{*н} = \sqrt{(1 \cdot 0,9)^2 + (1 \cdot 0,436 - 1 \cdot 0,18)^2} = 0,936 \text{ (в. о.)}$$

5.5. Розрахунок струмів короткого замикання в мережі вище 1 кв

Розрахунок точки К2.

. Розрахунок в іменованих одиницях:

Отримані опори елементів (розраховані вище) приведемо до основного щабля, на якому відбулося к.з.

Складемо схему заміщення точки К2:

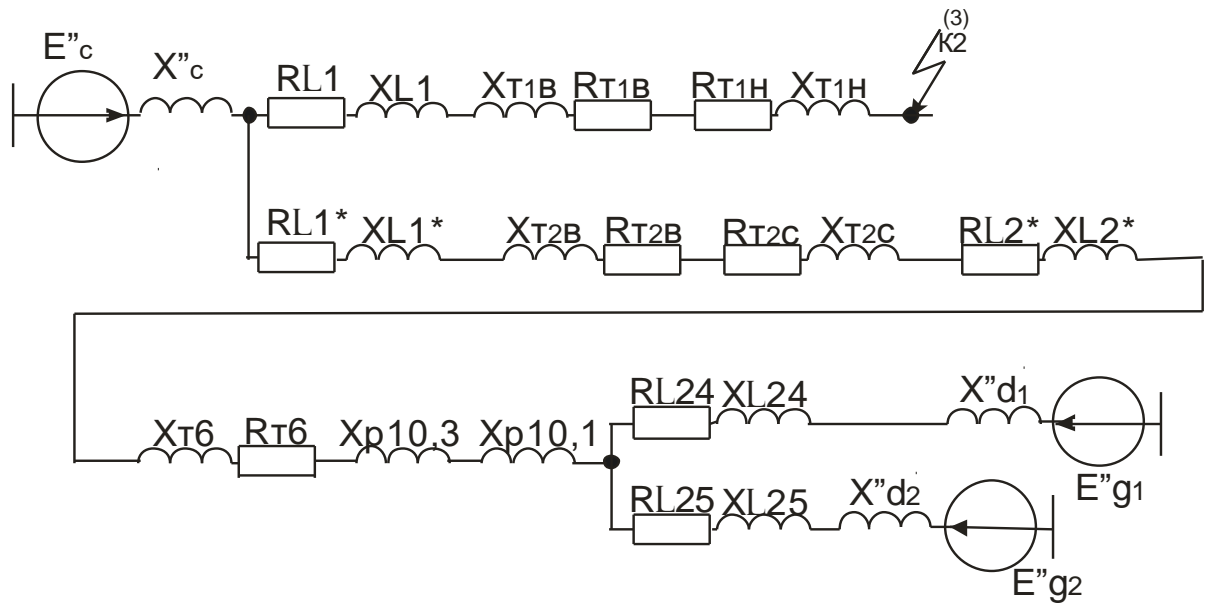


Рисунок 3- Схема заміщення точки К2

Приведемо опори елементів мережі до щабля напруги де відбулося КЗ.

Розрахуємо опори лінії.

$$r_{L1} = 94,4 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 94,4 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,283 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_{L1} = 36 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 36 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,108 \text{ Ом}$$

Опори трансформатора Т1:

$$\mathbf{r}_{T1(B-H)} = (\mathbf{r}_B + \mathbf{r}_H) \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = (1,481 + 1,481) \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 2,962 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 8,89 \cdot 10^{-3}$$

Ом

$$\mathbf{X}_{T1(B-H)} = (\mathbf{X}_B + \mathbf{X}_H) \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = (56,848 + 35,68) \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,278 \text{ Ом}$$

Сумарний активний й індуктивний опір:

$$\mathbf{r}_4 = \mathbf{r}_{L1} + \mathbf{r}_{T1(B-H)} = 0,283 + 8,89 \cdot 10^{-3} = 0,292 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_4 = \mathbf{X}_{L1} + \mathbf{X}_{T1(B-H)} = 0,108 + 0,278 = 0,386 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_4 = 0,292 + j386 \text{ Ом}$$

Опір ліній у відносних одиницях:

$$\mathbf{r}_{L1}^* = 94,4 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 94,4 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,283 \text{ (о. е)}$$

$$\mathbf{X}_{L1}^* = 36 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 36 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,108 \text{ (о. е)}$$

$$\mathbf{r}_{L2}^* = 1,34 \cdot \left(\frac{U_H}{U_C} \right)^2 = 1,34 \cdot \left(\frac{6,3}{37} \right)^2 = 0,039 \text{ (о. е)}$$

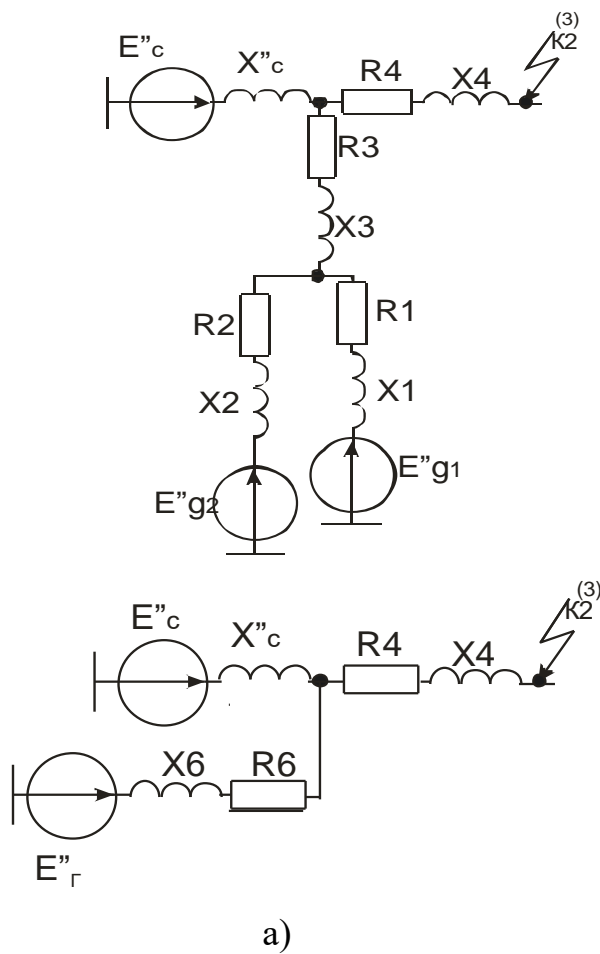


Рисунок 4 (а, б) - Схеми заміщення точки К2 послу спрощення

$$X_{L2}^* = 0,706 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c} \right)^2 = 0,706 \cdot \left(\frac{6,3}{37} \right)^2 = 0,02 \text{ (о. е)}$$

Опору трансформатора Т2:

$$R_{T2(B-c)} = 2,962 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 2,962 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 8,89 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$X_{T2(B-H)} = 56,848 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 56,848 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,171 \text{ Ом}$$

Опори трансформатора Т6:

$$\mathbf{r}_{T6} = 0,89 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c} \right)^2 = 0,89 \cdot \left(\frac{6,3}{37} \right)^2 = 0,026 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{T6} = 10,228 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c} \right)^2 = 10,228 \cdot \left(\frac{6,3}{37} \right)^2 = 0,296 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{p10,3} = -0,029 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{p10,1} = 0,087 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L24} = 0,262 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L24} = 0,024 \text{ Ом} \quad \mathbf{r}_{L25} = 0,231 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L25} = 0,021 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{d1} = \mathbf{x}_{d2} = \mathbf{x}_d = \mathbf{x}''_{dr} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,129 \cdot \frac{6,3^2}{31,25} = 0,164 \text{ Ом}$$

Сумарний опір:

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{r}_{L24} + \mathbf{x}_{L24} + \mathbf{x}_d = 0,262 + j0,024 + j0,164 = 0,262 + j0,188 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{r}_{L25} + \mathbf{x}_{L25} + \mathbf{x}_d = 0,231 + j0,021 + j0,164 = 0,231 + j0,185 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_5 = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_1} + \frac{1}{\mathbf{Z}_2}} = 0,123 + j0,093 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{E}_{r2} = \mathbf{E}_{r1} = \mathbf{E}''g = 6,819 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{Z}_5 \cdot \left(\frac{\mathbf{E}_{r1}}{\mathbf{Z}_1} + \frac{\mathbf{E}_{r2}}{\mathbf{Z}_2} \right) = 6,819 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_{L1} * + \mathbf{r}_{T2}(b-c) + \mathbf{r}_{L2} * + \mathbf{r}_{T6} = 0,283 + 8,89 \cdot 10^{-3} + 0,039 + 0,026 = 0,357 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_{L1} * + \mathbf{x}_{T2}(e-c) + \mathbf{x}_{L2} * + \mathbf{x}_{T6} + \mathbf{x}_{p10,3} + \mathbf{x}_{p10,1} = 0,108 + 0,171 + 0,02 + 0,296 - 0,029 + 0,087 = 0,65$$

$$\mathbf{Z}_6 = \mathbf{Z}_5 + \mathbf{Z}_3 = 0,123 + j0,093 + 0,357 + j0,65 = 0,48 + j0,746 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{x}''_c \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = \langle U_H = U_B \rangle = \mathbf{x}''_c \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,25 \cdot \frac{6,3^2}{320} = 0,031 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_{y.c} = \mathbf{x}_c + \mathbf{Z}_4 = j0,031 + 0,292 + j0,386 = 0,292 + j0,417 = 0,51 \cdot e^{j55} \text{ Ом}$$

$$Z_{y.g} = Z_6 + Z_4 = 0,48 + j0,746 + 0,292 + j0,386 = 0,772 + j1,132 = 1,37 \cdot e^{j55,7} \text{ Ом}$$

$$\frac{S_r \cdot Z_{y.g}}{S_c \cdot Z_{y.c}} = \frac{31,25 \cdot 2 \cdot 1,37}{320 \cdot 0,51} = 0,525 \quad \text{Оскільки } 0,525 \text{ входить у проміжок від } 0,4$$

до 2,5, то система й генератор можемо звести в еквівалентну ЕРС.

Тоді:

$$Z_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{y.g}} + \frac{1}{Z_{y.c}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,772 + j1,132} + \frac{1}{0,292 + j0,417}} = 0,768 + j1,13 \text{ Ом} \quad Z=0,371$$

Ом

$$E_{\text{екв}} = Z_{\text{екв}} \cdot \left(\frac{E}{Z_{y.g}} + \frac{E}{Z_{y.c}} \right) = 6,323 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$I_{\text{п}} = \frac{E_c}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{екв}}} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,371} = 9811,842 \text{ А}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot I_{\text{п}} = 107,066 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

$$I_y = \sqrt{2} \cdot I_{\text{пс}} \cdot \left(1 + e^{-\frac{(0,5\pi + \gamma_c) \cdot r_{y.c}}{x_{y.c}}} \right) = \left\langle \gamma_c = \arctg \frac{x_{y.c}}{r_{y.c}} = \arctg \frac{1,13}{1,768} \right\rangle =$$

$$= \sqrt{2} \cdot 7131,97 \cdot \left(1 + e^{-\frac{(0,5 \cdot 3,14 + 0,96) \cdot 1,768}{1,13}} \right) = 16337,36 \text{ А} \quad (5.29)$$

Розрахунок у відносних одиницях

$$U_6 = 6,3 \cdot 10^3 \text{ В.}$$

Нижче наведені всі необхідні розрахунки елементів мережі у відносних одиницях для визначення значення струму к.з. для точки К2 .

$$r_{L1}^* = 2,284 \text{ (о. е)}$$

$$x_{L1}^* = 0,871 \text{ (о. е)}$$

$$\mathbf{X}_{T1}(\mathbf{B}-\mathbf{H})^* = 2,239 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{T1}(\mathbf{B}-\mathbf{H})^* = 0,0716 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_4^* = \mathbf{\Gamma}_{L1}^* + \mathbf{\Gamma}_{T1}(\mathbf{B}-\mathbf{c})^* = 2,284 + 0,0716 = 2,356 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_4^* = \mathbf{X}_{L1}^* + \mathbf{X}_{T1}(\mathbf{B}-\mathbf{H})^* = 0,871 + 2,239 = 3,11 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{Z}_4 = 2,356 + j3,11$$

$$\mathbf{X}_{T2}(\mathbf{B}-\mathbf{c})^* = 1,376 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{T2}(\mathbf{B}-\mathbf{c})^* = 0,0716 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{L2}^* = 0,313 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{L2}^* = 0,165 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{T6}^* = 0,208 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{T6}^* = 2,391 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{p10,3}^* = \frac{-9237604307}{U_6^2} = \frac{-9237604307}{6,3^2 \cdot 10^6} = -0,233 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{p10,1}^* = \frac{2771281292}{U_6^2} = \frac{2771281292}{6,3^2 \cdot 10^6} = 0,698 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{L24}^* = 2,11 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{L24}^* = 0,194 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{L25}^* = 1,717 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{L25}^* = 0,169 \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{X}_{d1} = \mathbf{X}_{d2} = \mathbf{X}_d = \mathbf{X}''_{dr} \cdot \frac{\mathbf{S}_6}{\mathbf{S}_n} = 0,129 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{31,25 \cdot 10^6} = 1,321$$

$$\mathbf{Z}_1^* = \mathbf{\Gamma}_{L24}^* + \mathbf{X}_{L24}^* + \mathbf{X}_d = 2,11 + j0,194 + j1,321 = 2,11 + j1,515 = 2,597 \cdot e^{j35,7} \text{ (o. e)}$$

$$\mathbf{Z}_2^* = \mathbf{\Gamma}_{L25}^* + \mathbf{X}_{L25}^* + \mathbf{X}_d = 1,717 + j0,169 + j1,321 = 1,717 + j1,49 = 2,273 \cdot e^{j40,95} \text{ (o. e)}$$

$$Z_5 = \frac{1}{\frac{1}{Z_1^*} + \frac{1}{Z_2^*}} = \frac{1}{\frac{1}{2,597 \cdot e^{j35,7}} + \frac{1}{2,273 \cdot e^{j40,95}}} = 1,214 \cdot e^{j38,5} = 0,95 + j0,755$$

(o. e)

$$R_3^* = R_{L1}^* + R_{T2}(B-c)^* + R_{L2}^* + R_{T6}^* = 2,284 + 0,0716 + 0,313 + 0,208 = 2,877 \text{ (o. e)}$$

$$X_3^* = X_{L1}^* + X_{T2}(B-c)^* + X_{L2}^* + X_{T6}^* + X_{p10,3} + X_{p10,1} = 0,871 + 1,376 + 0,165 + 2,391 - 0,233 + 0,698 = 5,268 \text{ (o. e)}$$

$$Z_3^* = 2,77 + j2,877 \text{ (o. e)}$$

$$Z_6^* = Z_5^* + Z_3^* = 0,95 + j0,755 + 2,87 + j5,268 = 3,827 + j6,023 \text{ (o. e)}$$

$$Z_{y.c}^* = X_c^* + Z_4^* = j0,25 + 2,356 + j3,11 = 2,356 + j3,36 = 4,1 \cdot e^{j54,96} \text{ (o. e)}$$

$$Z_{y.r}^* = Z_6^* + Z_4^* = 3,827 + j6,023 + 2,356 + j3,11 = 6,183 + j9,133 = 11,03 \cdot e^{j55,9} \text{ (o. e)}$$

e)

$$\frac{S_r \cdot Z_{y.r}}{S_c \cdot Z_{y.c}} = \frac{31,25 \cdot 2 \cdot 11,03}{320 \cdot 4,1} = 0,525 \text{ (o. e)}$$

Розрахуємо складові струмів короткого замикання.

$$Z_{екв}^* = \frac{1}{\frac{1}{Z_{y.r}^*} + \frac{1}{Z_{y.c}^*}} = \frac{1}{\frac{1}{6,183 + j9,133} + \frac{1}{2,356 + j3,36}} = 1,706 + j2,457 \text{ (o. e)} \quad Z = 2,991$$

(o. e)

$$E_{екв}^* = Z_{екв}^* \cdot \left(\frac{E_r^*}{Z_{y.r}^*} + \frac{E_c^*}{Z_{y.c}^*} \right) = 1,06 \text{ (o. e)}$$

$$E_c^* = 1 \quad E_r^* = 1,082$$

$$I_{п}^* = \frac{E_{екв}}{Z_{екв}} = \frac{1,022}{2,991} = 0,341 \text{ (o. e)}$$

$$I_{п} = I_{п}^* \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = 10020,3 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{п} = 109,341 \text{ MB}^* \text{ A}$$

$$I_y = \sqrt{2} \cdot I_{nc} \cdot \left(1 + e^{-\frac{(0,5\pi + \gamma_c) \cdot R_{y.c}}{X_{y.c}}} \right) = \langle \gamma_c = \arctg \frac{X_{y.c}}{R_{y.c}} = \arctg \frac{2,457}{1,706} = 0,96 \text{ рад} \rangle =$$

$$= 16609,13 \text{ A}$$

Розрахунок точки К1,5

Складемо схему заміщення:

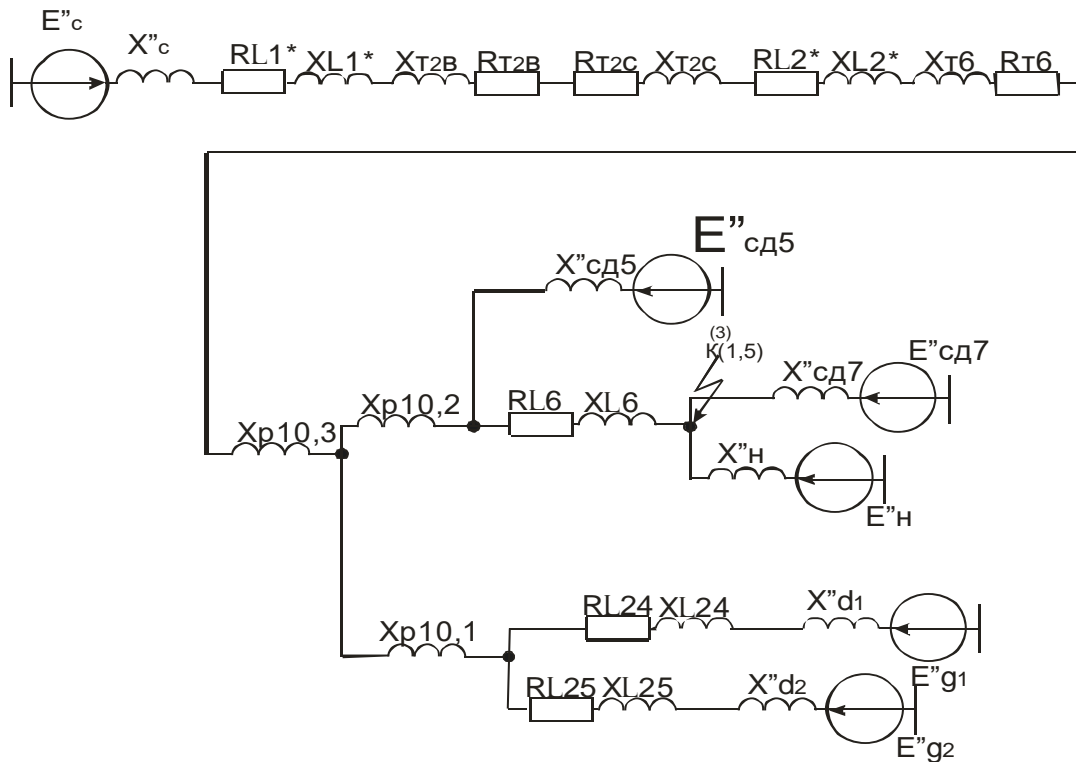


Рисунок 5 – Схема заміщення точки К1,5

Розрахунок в іменованих одиницях:

$$X_c = X''_c \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = \langle U_H = U_B \rangle = X''_c \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,25 \cdot \frac{6,3^2}{320} = 0,031 \text{ Ом}$$

$$R_{L1}^* = 94,4 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 94,4 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,283 \text{ Ом}$$

$$X_{L1}^* = 36 \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 36 \cdot \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,108 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{T2B} = 1,481 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 4,445 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{T2c} = 1,481 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 4,445 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{T2}(e-c) = 56,848 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,171 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L2*} = 1,34 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c}\right)^2 = 1,34 \cdot \left(\frac{6,3}{37}\right)^2 = 0,039 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{L2*} = 0,706 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c}\right)^2 = 0,706 \cdot \left(\frac{6,3}{37}\right)^2 = 0,02 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{T6} = 0,89 \cdot \left(\frac{U_H}{U_c}\right)^2 = 0,89 \cdot \left(\frac{6,3}{37}\right)^2 = 0,026 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{p10,3} = -0,029 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{p10,1,2} = 0,087 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L6} = 0,15 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L6} = 0,1 \text{ Ом} \quad \mathbf{r}_{L20} = 0,24 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L20} = 0,082 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L23} = 0,343 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L23} = 0,115 \text{ Ом} \quad \mathbf{r}_{L22} = 0,23 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L22} = 0,077 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L24} = 0,262 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L24} = 0,024 \text{ Ом} \quad \mathbf{r}_{L25} = 0,231 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L25} = 0,021 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{r}_{L21} = 0,118 \text{ Ом} \quad \mathbf{x}_{L21} = 0,04 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{cд5} = \mathbf{x}''_{cд} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{6,3^2}{1,85} = 4,291 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{x}_{cд7} = 0,2 \cdot \frac{6,3^2}{1,16} = 6,84 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{E}''_{cд5} = 7,018 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\mathbf{E}''_{cд7} = 7,023 \cdot 10^3 \text{ В}$$

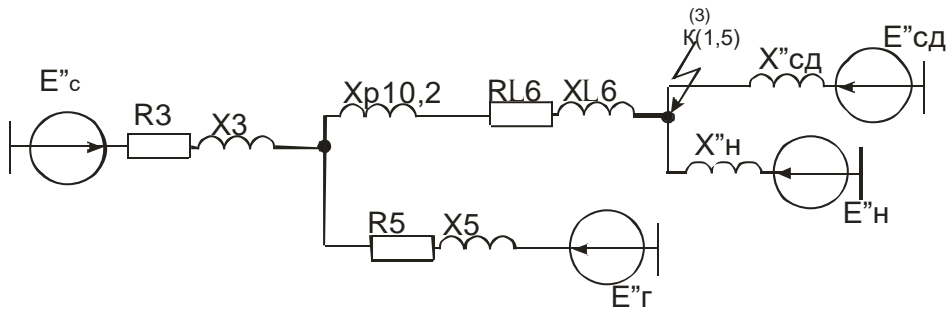


Рисунок 6 - Схема заміщення точки K1,5 після спрощення.

$$Z_{сд} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{сд5} + Z_{L6}} + \frac{1}{Z_{сд7}}} = \frac{1}{\frac{1}{j4,291 + 0,15} + \frac{1}{j6,843}} = 2,676 \cdot e^{j88,8} = 0,56 + j2,675$$

Ом

$$E_{сд} = Z_{сд} = \left(\frac{7,018 \cdot 10^3}{4,393} + \frac{7,023 \cdot 10^3}{6,843} \right) = 7,021 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$X_{d1} = X_{d2} = X_d = X''_d \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = 0,129 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{31,25} = 0,164 \text{ Ом}$$

$$Z_1 = \Gamma_{L24} + X_{L24} + X_d = 0,262 + j0,024 + j0,164 = 0,262 + j0,188 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \Gamma_{L25} + X_{L25} + X_d = 0,231 + j0,021 + j0,164 = 0,231 + j0,185 \text{ Ом}$$

$$Z_5 = Z_{P10,1} + \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = j0,087 + \frac{1}{\frac{1}{0,262 + j0,188} + \frac{1}{0,231 + j0,185}} = 0,123 + j0,18 \text{ Ом}$$

$$E_{Г2} = E_{Г1} = E''_g = 6,819 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$Z_{Г} = Z_5 + X_{P10,2} + Z_{L6} = 0,123 + j0,18 + j0,087 + 0,15 + j0,1 = 0,273 + j0,366 = 0,454 e^{j53,3}$$

Ом

$$\Gamma_3 = \Gamma_{L1} + \Gamma_{Г2}(b-c) + \Gamma_{L2} + \Gamma_{Г6} = 0,283 + 8,89 \cdot 10^{-3} + 0,039 + 0,026 = 0,357 \text{ Ом}$$

$$X_3 = X_c + X_{L1} + X_{Г2}(b-c) + X_{L2} + X_{Г6} + X_{P10,3} = 0,03 + 0,11 + 0,171 + 0,02 + 0,0296 - 0,029 = 0,598$$

Ом

$$\mathbf{Z}_c = \mathbf{Z}_3 + \mathbf{X}_{P10,2} + \mathbf{Z}_{L6} = 0,357 + j0,598 + j0,087 + 0,15 + j0,1 = 0,507 + j0,784 = 0,934e^{j57}$$

ОМ

$$\frac{\mathbf{S}_c \cdot \mathbf{Z}_c}{\mathbf{S}_r \cdot \mathbf{Z}_r} = \frac{320 \cdot 0,934}{62,5 \cdot 0,454} = 10,523 \square \text{ поєднувати неприпустимо}$$

$$\frac{\mathbf{Z}_{cd}}{\mathbf{Z}_r} = \frac{320}{0,454} = 5,89 \square \text{ оскільки } 5,89 < 20, \text{ то зневажити менш потужним}$$

джерелом не можемо.

Розрахунок навантаження.

$$\mathbf{X}''_{H^*} = 0,18$$

$$\mathbf{E}''_{H^*} = 0,936$$

$$\mathbf{E}_H = \mathbf{E}^* \cdot \mathbf{U}_{CP.OCH} = 0,936 \cdot 6,3 \cdot 10^3 = 5,897 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\mathbf{X}_{H25} = \mathbf{X}_H^* \cdot \frac{\mathbf{U}_{НОМ}^2}{\mathbf{S}_{НОМ}} = 0,18 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} = 14,29 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_{H24} = \mathbf{X}_H^* \cdot \frac{\mathbf{U}_{НОМ}^2}{\mathbf{S}_{НОМ}} = 0,18 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{1,2 \cdot 10^6} = 5,954 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_{H23} = \mathbf{X}_H^* \cdot \frac{\mathbf{U}_{НОМ}^2}{\mathbf{S}_{НОМ}} = 0,18 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 10^6} = 8,93 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_{H16} = \mathbf{X}_H^* \cdot \frac{\mathbf{U}_{НОМ}^2}{\mathbf{S}_{НОМ}} = 0,18 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{1,9 \cdot 10^6} = 3,76 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{X}_{H4} = \mathbf{X}_H^* \cdot \frac{\mathbf{U}_{НОМ}^2}{\mathbf{S}_{НОМ}} = 0,18 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 10^6}{0,32 \cdot 10^6} = 22,326 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_{25} = \mathbf{Z}_{L23} + \mathbf{X}_{H25} = 0,343 + j0,115 + j14,29 = 0,343 + j14,403 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_{24} = \mathbf{Z}_{L22} + \mathbf{X}_{H24} = 0,23 + j0,077 + j5,954 = 0,23 + j6,03 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_{23} = \mathbf{Z}_{L21} + \mathbf{X}_{H23} = 0,118 + j0,04 + j8,93 = 0,118 + j8,97 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_{16} = \mathbf{X}_{H16} = j3,76 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z}_4 = \mathbf{Z}_{L6} + \mathbf{X}_{H4} = 0,15 + j0,1 + j22,326 = 0,15 + j22,425 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{25}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{24}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{23}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{16}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,343 + j14,403} + \frac{1}{0,23 + j6,031} + \frac{1}{0,118 + j8,97} + \frac{1}{j3,76}} = 0,025 + j1,633$$

ОМ

$$\mathbf{Z}_H = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{L20}} + \frac{1}{\mathbf{Z}_4}} = \frac{1}{\frac{1}{0,025 + j1,633 + 0,24 + j0,082} + \frac{1}{0,15 + j22,425}} = 0,229 + j1,595 = 1,611e^{j81,8}$$

ОМ

$$I_{п.с} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot Z_c} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,934} = 3894,3 \text{ A}$$

$$I_{п.г} = \frac{E''_g}{\sqrt{3} \cdot Z_g} = \frac{6,819 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,454} = 8671,7 \text{ A}$$

$$I_{п.н} = \frac{E''_H}{\sqrt{3} \cdot Z_H} = \frac{5,897 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,611} = 2113,368 \text{ A}$$

$$I_{п.сд} = \frac{E''_{сд}}{\sqrt{3} \cdot Z_{сд}} = \frac{7,021 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,676} = 1514,8 \text{ A}$$

Знайдемо ударний струм:

$$I_{y.c} = \sqrt{2} \cdot 3894,3 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{0,7}{0,507}\right) \cdot 0,507}{0,7}} \right) = 6398,514 \text{ A}$$

$$I_{y.g} = \sqrt{2} \cdot 8671,7 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{0,36}{0,229}\right) \cdot 0,273}{0,36}} \right) = 14115,7 \text{ A}$$

$$I_{y.H} = \sqrt{2} \cdot 2113,4 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{1,595}{0,229}\right) \cdot 0,229}{1,595}} \right) = 4931,845 \text{ A}$$

$$I_{y.cд} = \sqrt{2} \cdot 1514,8 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{2,675}{0,056}\right) \cdot 0,056}{2,675}} \right) = 4148,9 \text{ A}$$

$$I_{\Sigma n} = I_{H.C} + I_{ПГ} + I_{ПН} + I_{H.CД} = 3894,3 + 8671,7 + 2113,368 + 1514,8 = 16194,19$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{\Sigma n} = 176,709 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

6.2.2 Розрахунок у відносних одиницях К1,5: $S_6=320 \text{ МВА}$, $U_6=6,3$ доВ.

$$\mathbf{r}_{L1}^* = 2,284 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{L1}^* = 0,871 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_c^* = 0,25 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{T2(B-c)}^* = 0,0716 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{T2(B-c)}^* = 1,376 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{L2}^* = 0,313 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{L2}^* = 0,165 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{T6}^* = 0,208 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{T6}^* = 2,391 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{x}_{p10,3}^* = \frac{-9237604307}{U_6^2} = \frac{-9237604307}{6,3^2 \cdot 10^6} = -0,233 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{x}_{p10,1}^* = \frac{2771281292}{U_6^2} = \frac{2771281292}{6,3^2 \cdot 10^6} = 0,698 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{x}_{cд5} = \mathbf{x}''_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{320}{1,85} = 34,596 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{x}_{cд7} = 0,2 \cdot \frac{320}{1,16} = 55,172 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{L6}^* = 1,209 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{L6}^* = 0,798 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{L24}^* = 2,11 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{L24}^* = 0,194 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{r}_{L25}^* = 1,717 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{x}_{L25}^* = 0,169 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{x}_{d1}^* = \mathbf{x}_{d2}^* = \mathbf{x}_d^* = \mathbf{x}''_d \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} = 0,129 \cdot \frac{320}{31,25} = 1,321 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_1^* = \mathbf{r}_{L24}^* + \mathbf{j} \mathbf{x}_{L24}^* + \mathbf{x}_d^* = 2,11 + \mathbf{j}0,194 + \mathbf{j}1,321 = 2,11 + \mathbf{j}1,515 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_2^* = \mathbf{r}_{L25}^* + \mathbf{X}_{L25}^* + \mathbf{X}_d^* = 1,717 + \mathbf{j}0,169 + \mathbf{j}1,321 = 1,717 + \mathbf{j}1,49 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{Z}_5^* = \mathbf{X}_{P10,1}^* + \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_1^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_2^*}} = \mathbf{j}0,698 + \frac{1}{\frac{1}{2,11 + \mathbf{j}1,515} + \frac{1}{1,717 + \mathbf{j}1,19}} = 0,95 + \mathbf{j}1,453 \quad (\text{B. O.})$$

о.)

Розрахунок навантаження.

$$\mathbf{X}''_{H^*} = 0,18 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{E}''_{H^*} = 0,936 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{H25}^* = \mathbf{X}''_{H^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \frac{320}{0,5} = 115,2 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{H24}^* = \mathbf{X}''_{H^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \frac{320}{1,2} = 48 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{H23}^* = \mathbf{X}''_{H^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \frac{320}{0,8} = 72 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{H16}^* = \mathbf{X}''_{H^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \frac{320}{1,9} = 30,316 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{H4}^* = \mathbf{X}''_{H^*} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \frac{320}{0,32} = 180 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{r}_{L23}^* = 2,765 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{L23}^* = 0,927 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{r}_{L22}^* = 1,854 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{L22}^* = 0,621 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{r}_{L21}^* = 0,951 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{L25}^* = 0,323 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{r}_{L20}^* = 1,935 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{X}_{L20}^* = 0,661 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{Z}_{25}^* = \mathbf{r}_{L23}^* + \mathbf{X}_{H25}^* + \mathbf{X}_{L23}^* = 2,765 + \mathbf{j}115,2 + \mathbf{j}0,927 = 2,765 + \mathbf{j}116,127 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{Z}_{24}^* = \mathbf{r}_{L22}^* + \mathbf{X}_{H25}^* + \mathbf{X}_{L22}^* = 1,854 + \mathbf{j}48 + \mathbf{j}0,621 = 1,854 + \mathbf{j}48,62 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{Z}_{23}^* = \mathbf{r}_{L21}^* + \mathbf{X}_{H23}^* + \mathbf{X}_{L21}^* = 0,951 + \mathbf{j}72 + \mathbf{j}0,323 = 0,951 + \mathbf{j}72,323 \quad (\text{B. O.})$$

$$\mathbf{Z}_{16}^* = \mathbf{X}_{H16}^* = \mathbf{j}30,316 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_4^* = \mathbf{r}_{L6}^* + \mathbf{X}_{H4}^* + \mathbf{X}_{L6}^* = 1,209 + \mathbf{j}180 + \mathbf{j}0,798 = 1,209 + \mathbf{j}180,798 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_5^* = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{25}^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{24}^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{23}^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{16}^*}} = \frac{1}{\frac{1}{2,765 + \mathbf{j}116,127} + \frac{1}{1,854 + \mathbf{j}48,62} + \frac{1}{0,951 + \mathbf{j}72,323} + \frac{1}{\mathbf{j}30,316}} = 0,203 + \mathbf{j}13,163$$

(В. О.)

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{Z}^* \cdot \left(\frac{\mathbf{E}_{25}^*}{\mathbf{Z}_{25}^*} + \frac{\mathbf{E}_{24}^*}{\mathbf{Z}_{24}^*} + \frac{\mathbf{E}_{23}^*}{\mathbf{Z}_{23}^*} + \frac{\mathbf{E}_{16}^*}{\mathbf{Z}_{16}^*} \right) = 0,936 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_{H}^* = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_5^* + \mathbf{Z}_{20}^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_4^*}} = \frac{1}{\frac{1}{0,203 + \mathbf{j}13,163 + 1,935 + \mathbf{j}0,661} + \frac{1}{1,209 + \mathbf{j}180,798}} = 1,85 + \mathbf{j}12,86 = 12,99e^{\mathbf{j}81,8}$$

(В. О.)

$$\mathbf{S}_H = \mathbf{S}_{25} + \mathbf{S}_{24} + \mathbf{S}_{23} + \mathbf{S}_{16} + \mathbf{S}_4 = 0,5 + 1,2 + 0,8 + 1,9 + 0,32 = 4,72$$

$$\mathbf{Z}_{CD}^* = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{Z}_{CD5}^* + \mathbf{Z}_{L6}^*} + \frac{1}{\mathbf{Z}_{CD7}^*}} = \frac{1}{\frac{1}{\mathbf{j}34,6 + 1,21 + \mathbf{j}0,798} + \frac{1}{\mathbf{j}55,172}} = 0,449 + \mathbf{j}21,57 = 21,58e^{\mathbf{j}88,8}$$

(В. О.)

$$\mathbf{E}''_{CD}^* = \frac{\mathbf{E}''_{\Gamma}^*}{U_{CP,i}} = 1,114 \text{ (В. О.)} \quad \mathbf{E}_{CD7}^* = 1,115 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{E}''_{CD}^* = \mathbf{Z}_{CD}^* \cdot \left(\frac{\mathbf{E}_{CD5}^*}{\mathbf{Z}_{CD5}^* + \mathbf{Z}_{L6}^*} + \frac{\mathbf{E}_{CD7}^*}{\mathbf{Z}_{CD7}^*} \right) = 1,115 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{Z}_{\Gamma} = \mathbf{Z}_5 + \mathbf{X}_{P10,2} + \mathbf{Z}_{L6} = 0,95 + 1,029 + \mathbf{j}1,453 + \mathbf{j}0,798 + 0,698 = 2,159 + \mathbf{j}2,949 = 3,66e^{\mathbf{j}53,8}$$

ОМ

$$\mathbf{S}_{CD} = \mathbf{S}_{CD5} + \mathbf{S}_{CD7} = 1,85 + 1,16 = 3,01 \text{ Ом}$$

$$\mathbf{S}_{\Gamma} = \mathbf{S}_{\Gamma1} + \mathbf{S}_{\Gamma2} = 31,25 + 31,25 = 62,5 \text{ Ом}$$

$$\frac{\mathbf{Z}_{CD}^*}{\mathbf{Z}_{\Gamma}^*} = \frac{21,58}{3,66} = 5,9 \square \text{ зневажити } \mathbf{E}_{CD} \text{ не можна оскільки } 5,9 < 20$$

$$\frac{\mathbf{S}_{CD} \cdot \mathbf{Z}_{CD}^*}{\mathbf{S}_{\Gamma} \cdot \mathbf{Z}_{\Gamma}^*} = \frac{3,01 \cdot 21,58}{62,5 \cdot 3,66} = 0,284 \square \text{ поєднувати не можна оскільки } 0,284 \text{ не}$$

входить у проміжок від 0,4 до 2,5

$$\mathbf{\Gamma}_3^* = \mathbf{\Gamma}_{L1}^* + \mathbf{\Gamma}_{T2}(\mathbf{b} - \mathbf{c})^* + \mathbf{\Gamma}_{L2}^* + \mathbf{\Gamma}_{T6}^* = 2,28 + 0,072 + 0,313 + 0,21 = 2,88 \text{ (В. О.)}$$

$$\mathbf{X}_3^* = \mathbf{X}_c^* + \mathbf{X}_{L1}^* + \mathbf{X}_{\Gamma 2}(\mathbf{B} - \mathbf{c})^* + \mathbf{X}_{L2}^* + \mathbf{X}_{\Gamma 6}^* + \mathbf{X}_{P10,3}^* = 0,25 + 0,87 + 1,38 + 0,165 + 2,39 - 0,23 = 4,82$$

(В. о.)

$$\mathbf{Z}_3^* = 2,87 + j4,82 = 5,613e^{j59} \text{ (В. о.)}$$

$$\mathbf{Z}_c^* = \mathbf{Z}_3^* + \mathbf{Z}_{L6}^* + \mathbf{X}_{P10,2} = 2,87 + j4,82 + 1,209 + j0,79 + j0,698 = 4,09 + j6,32 = 7,523e^{j57}$$

(В. о.)

$$\frac{\mathbf{S}_c \cdot \mathbf{Z}_c}{\mathbf{S}_\Gamma \cdot \mathbf{Z}_\Gamma} = \frac{320 \cdot 7,52}{62,5 \cdot 3,66} = 10,54 \square \text{ поєднувати неприпустимо}$$

$\epsilon C^* = 1$ (В. о.)

$$\mathbf{I}_c^* = \frac{\mathbf{E}_c^*}{\mathbf{Z}_c} = \frac{1}{7,52} = 3898,66 \text{ (В. о.)}$$

$$\mathbf{I}_{п.с}^* = \mathbf{I}_c^* \cdot \frac{\mathbf{S}_6}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_6} = 0,133 \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 3898,66 \text{ A}$$

$$\mathbf{E}_g = \frac{\mathbf{E}''_g}{\mathbf{U}_H} = \frac{6,819}{6,3} = 1,082 \text{ В}$$

$$\mathbf{I}_\Gamma^* = \frac{1,082}{3,66} = 0,296 \text{ (В. о.)}$$

$$\mathbf{I}_{п.Г} = \mathbf{I}_\Gamma^* \cdot \frac{\mathbf{S}_6}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_6} = \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 8684,4 \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{п.н}^* = \frac{\mathbf{E}_H}{\mathbf{Z}_H} = \frac{0,936}{12,98} = 0,072 \text{ (В. о.)}$$

$$\mathbf{I}_{п.н} = \mathbf{I}_{п.н}^* \cdot \frac{\mathbf{S}_6}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_6} = 0,072 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2112,43 \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{п.сд}^* = \frac{\mathbf{E}''_{сд}^*}{\mathbf{Z}_{сд}^*} = \frac{1,115}{21,576} = 0,0517 \text{ (В. о.)}$$

$$\mathbf{I}_{п.сд} = \mathbf{I}_{п.сд}^* \cdot \frac{\mathbf{S}_6}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_6} = 0,0517 \cdot \frac{320 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 1515,49 \text{ A}$$

Знайдемо ударний струм:

$$I_{y.c} = \sqrt{2} \cdot 3898,66 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{6,316}{1,086}\right) \cdot 4,086}{6,316}} \right) = 6560,92 \text{ A}$$

$$I_{y.\Gamma} = \sqrt{2} \cdot 8684,44 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{2,949}{2,159}\right) \cdot 2,159}{2,949}} \right) = 14237,39 \text{ A}$$

$$I_{y.H} = \sqrt{2} \cdot 2112,43 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{12,86}{1,85}\right) \cdot 1,85}{12,86}} \right) = 4927,7 \text{ A}$$

$$I_{y.cд} = \sqrt{2} \cdot 1515,5 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\left(0,5 \cdot 3,14 + \arctg \frac{21,57}{0,45}\right) \cdot 0,45}{21,57}} \right) = 4151,64 \text{ A}$$

Знайдемо потужність к.з.

$$I_{\Sigma \Pi} = I_{H.c} + I_{\Gamma} + I_{H} + I_{H.cд} = 3698,66 + 8684,44 + 2112,43 + 1515,5 = 16211$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{\Sigma \Pi} = 176,893 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

6.3 Розрахунок періодичної складової струму в момент часу $t_1=0.1\text{c}$ и $t_2=0.34\text{з}$

В іменованих одиницях:

$$I_{\Pi.o} * (\text{ном})_{\Gamma} = \frac{I_{\Pi.o}}{I(\text{ном})} = \frac{8671,7}{5727,68} = 1,514 \text{ (в. о.)}$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\Gamma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}}} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 5727,68 \text{ А}$$

Використовуючи типові криві зміни періодичної складової для генераторів 6 кВ ([2] рис. 5.7) знайдемо значення періодичної складової струму к. з. через час $t_1=0.1\text{с}$ і $t_2=0.34\text{з}$ після короткого замикання.

$$J_{t1}=1 \rightarrow I_{\text{пт}1} = J_{t1} \cdot I_{\text{п}0} = 1 \cdot 867,7 = 8671,7 \text{ А}$$

$$J_{t2}=1 \rightarrow I_{\text{пт}2} = J_{t2} \cdot I_{\text{п}0} = 1 \cdot 867,7 = 8671,7 \text{ А}$$

Для знаходження періодичної складової СД під час t_n синхронних двигунів ([2] рис. 5.10)

$$I_o^*(\text{ном})_{\text{сд}} = \frac{I_{\text{п.о}}}{I(\text{ном})} = \frac{1514,79}{275,85} = 5,5 \text{ (в. о.)}$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{сд}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}}} = \frac{3,01 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 275,85 \text{ А}$$

$$J_{t1}=0,72 \rightarrow I_{\text{пт}1\text{сд}} = J_{t1} \cdot I_{\text{п}0} = 0,72 \cdot 1514,79 = 1090,65 \text{ А}$$

$$J_{t2}=0,65 \rightarrow I_{\text{пт}2} = J_{t2} \cdot I_{\text{п}0} = 0,65 \cdot 1514,79 = 984,6 \text{ А}$$

Той же розрахунок для навантаження АД ([2] рис.5.11)

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}}} = \frac{4,72 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 432,56 \text{ А}$$

$$I_o^*(\text{ном})_{\text{н}} = \frac{23,37}{432,56} = 4,89 \text{ (в. о.)}$$

$$J_{t1}=0,25 \rightarrow I_{\text{пт}1\text{н}} = J_{t1} \cdot I_{\text{п}0} = 0,25 \cdot 2113,4 = 528,3 \text{ А}$$

$$J_{t2}=0 \rightarrow I_{\text{пт}2} = 0$$

У відносних одиницях:

$$I_o^*(\text{ном})_{\Gamma} = I_{\text{б.г}}^* \cdot \frac{S_{\Gamma}}{S(\text{ном})_{\Gamma}} = 0,296 \cdot \frac{320}{62,5} = 1,515 \text{ (в. о.)}$$

$$J_{t1}=1 = J_{t2};$$

$$I_{\text{пт}1\text{м}} = I_{\text{пт}2\text{м}} = I_{\text{п}0} = 8684,44 \text{ А.}$$

$$I_{0*}(\text{ном})_{\text{сд}} = I_{\text{сд}*} \cdot \frac{S_6}{S(\text{ном})_{\text{сд}}} = 0,0517 \cdot \frac{320}{3,01} = 5,496 \text{ (В. о.)}$$

$$J_{t1}=0,72 \rightarrow I_{\text{пт1сд}} = J_{t1} \cdot I_{\text{п0}} = 0,72 \cdot 1515,49 = 1091,15 \text{ А}$$

$$J_{t2}=0,65 \rightarrow I_{\text{пт2}} = J_{t2} \cdot I_{\text{п0}} = 0,65 \cdot 1515,49 = 985,06 \text{ А}$$

$$I_{0*}(\text{ном})_{\text{н}} = 0,072 \cdot \frac{320}{4,72} = 4,88 \text{ (В. о.)}$$

$$J_{t1}=0,25 \rightarrow I_{\text{пт1н}} = J_{t1} \cdot I_{\text{п0}} = 0,25 \cdot 2112,43 = 528,1 \text{ А}$$

$$J_{t2}=0 \rightarrow I_{\text{пт2}} = 0$$

5.6. Моделювання особливої точки

З розрахунків вище бачимо, що ЕРС системи, генератора, навантаження й СД звести в одну еквівалентну ЕРС неприпустимо. Із цієї причини моделювати систему будемо в роздріб, тобто вплив на струм у точці к.з. від кожного з перерахованих джерел визначимо індивідуально.

За допомогою пакета моделювання MATLAB створимо модель гілки, що з'єднує еквівалентний генератор із точкою к.з. Для цього два генератори Г1 і Г2 зведемо в еквівалентний один Г (при моделюванні G1). Дані для моделювання візьмемо вище.

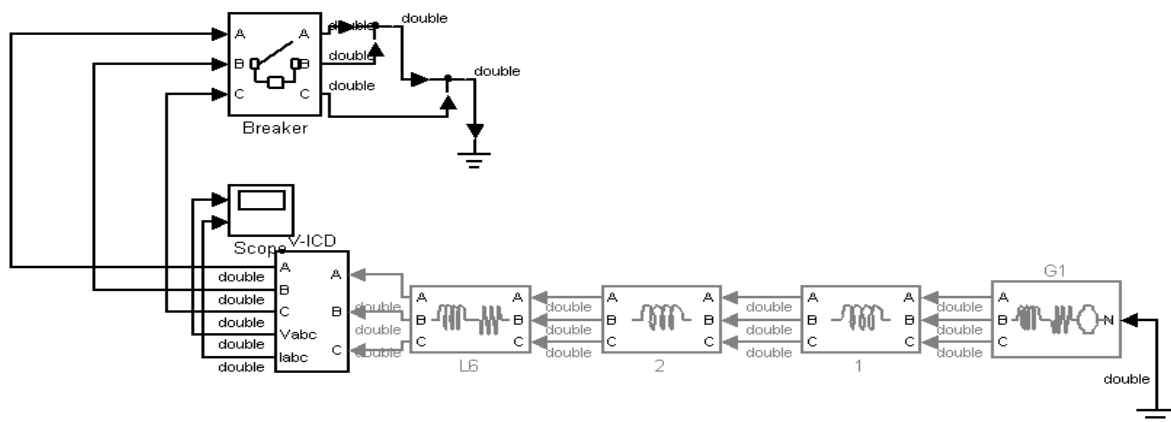


Рисунок 7- Модель схеми заміщення гілки від точки к.з до генератора

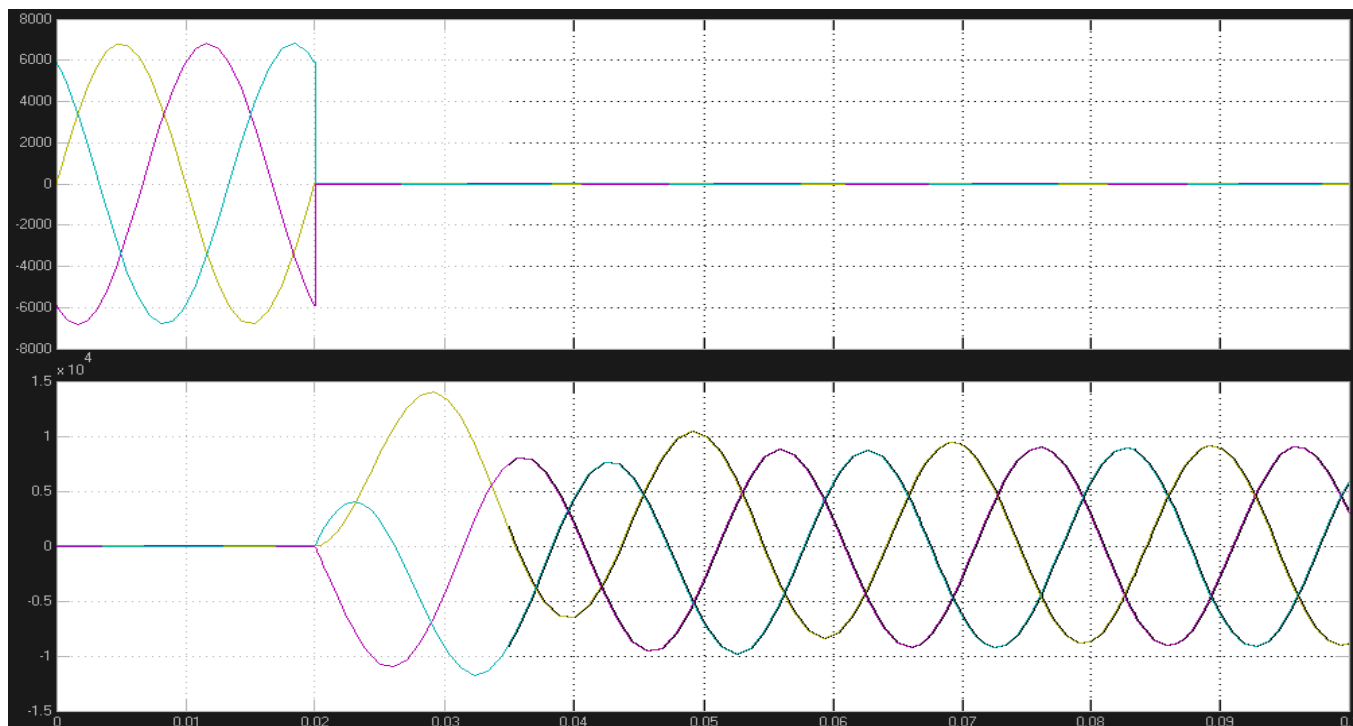


Рисунок 8- Залежності напруги в точці к.з. і струму в гілці генератора

від часу

Створимо модель гілки, що з'єднає систему із точкою к. з.

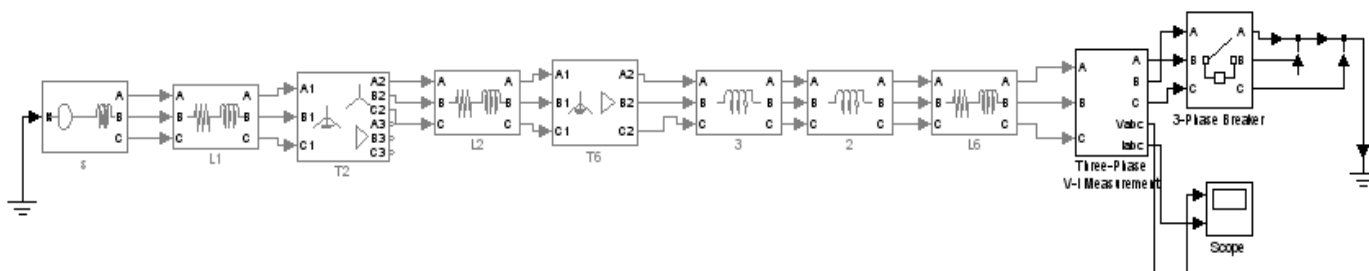


Рисунок 9- Модель схеми заміщення гілки від точки к.з до генератора

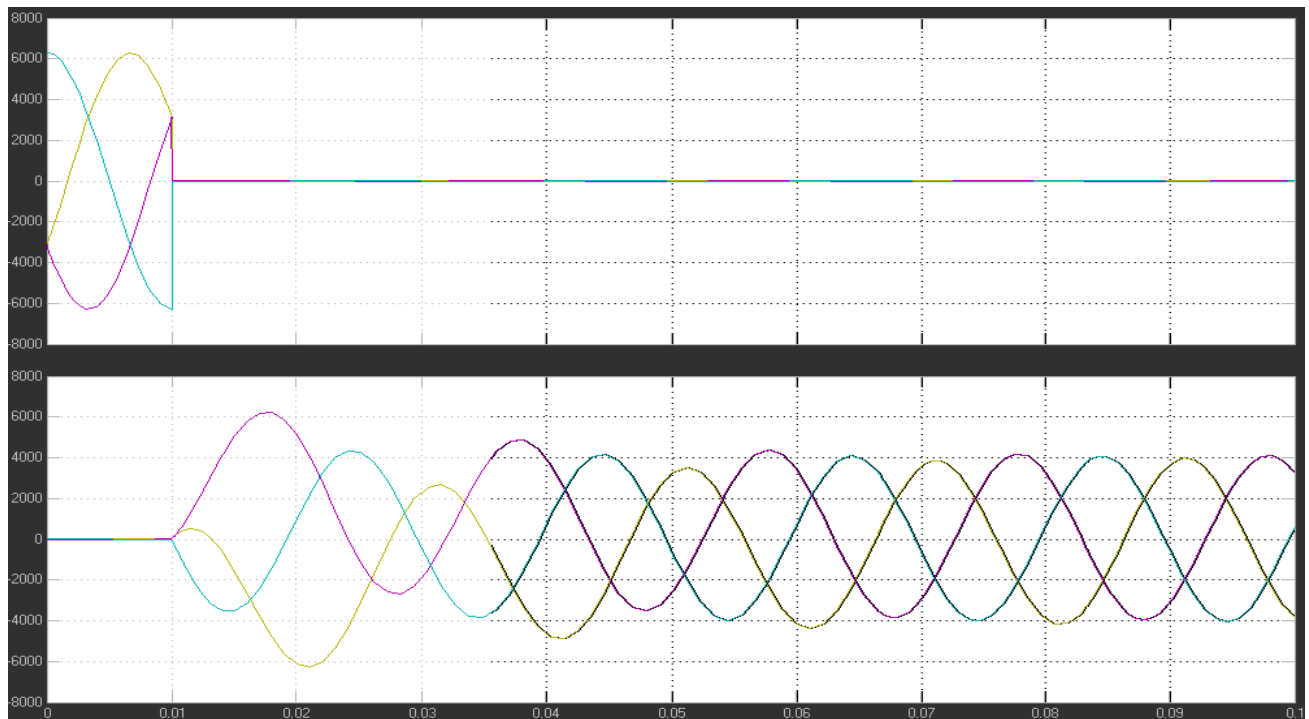


Рисунок 10- Залежності напруги в точці к.з. і струму в гілці системи від часу

Створимо модель гілки, що з'єднує ЕРС навантаження із точкою к.з.

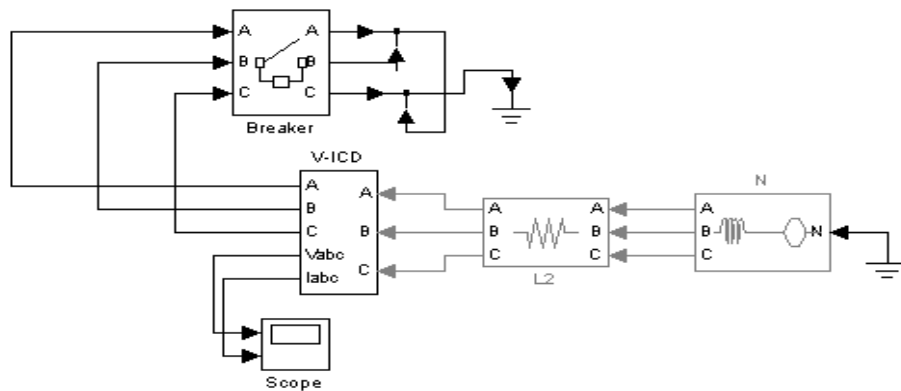


Рисунок 11 - Модель схеми заміщення гілки від точки к.з до ЕДС навантаження

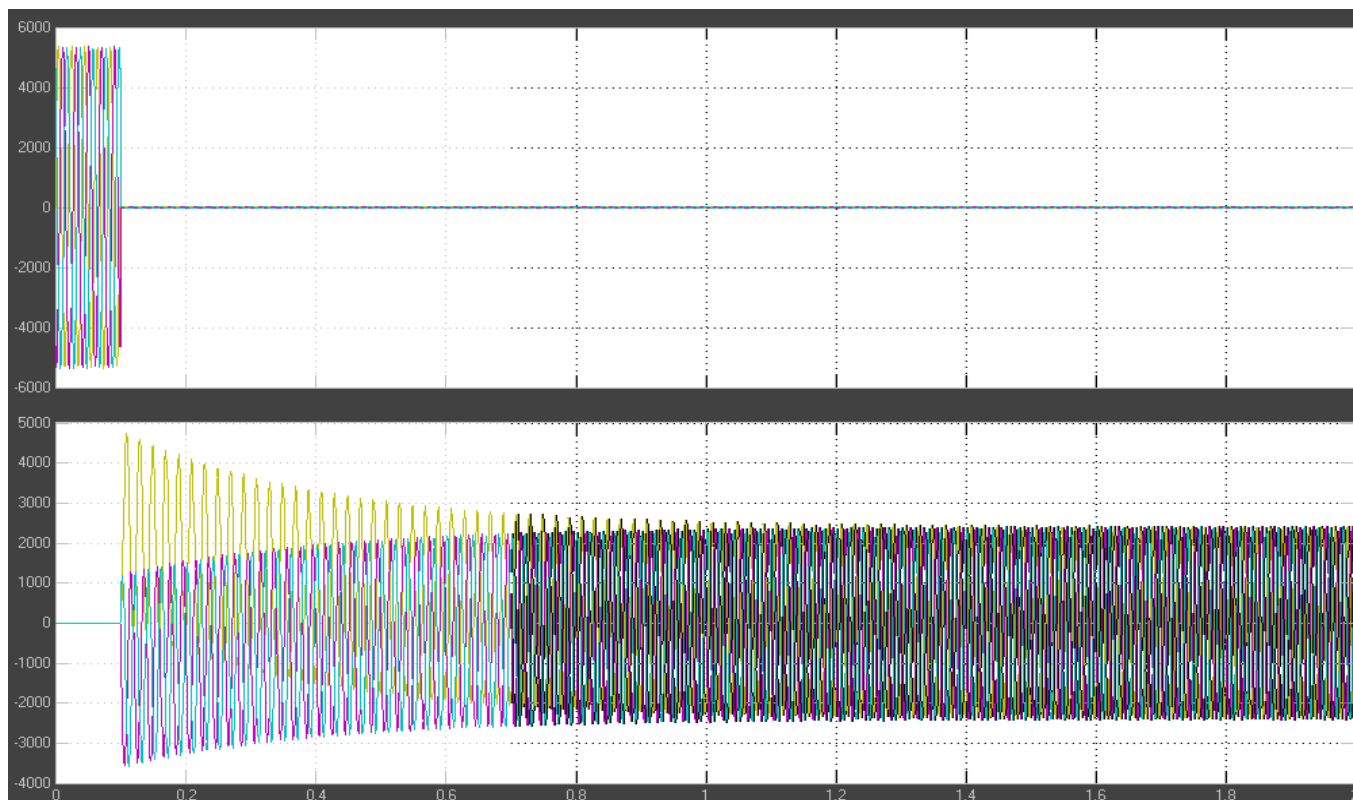


Рисунок 12 - Залежності напруги в точці к.з. і струму в гілці навантаження від часу

Створимо модель гілки, що з'єднує еквівалентну ЕРС синхронних двигунів із точкою к.з. Розрахунок еквівалентної ЕРС наведений вище.

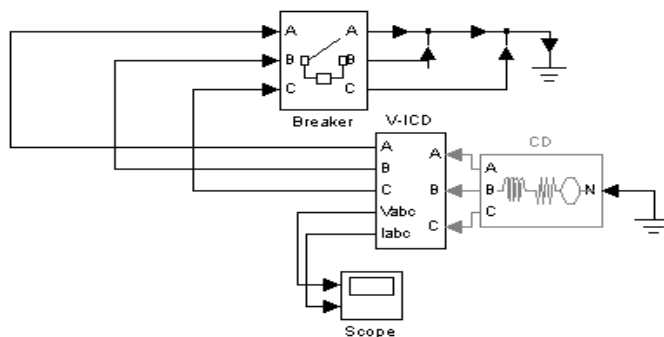


Рисунок 13 - Модель схеми заміщення гілки від точки к.з до еквівалентної ЕРС синхронних двигунів

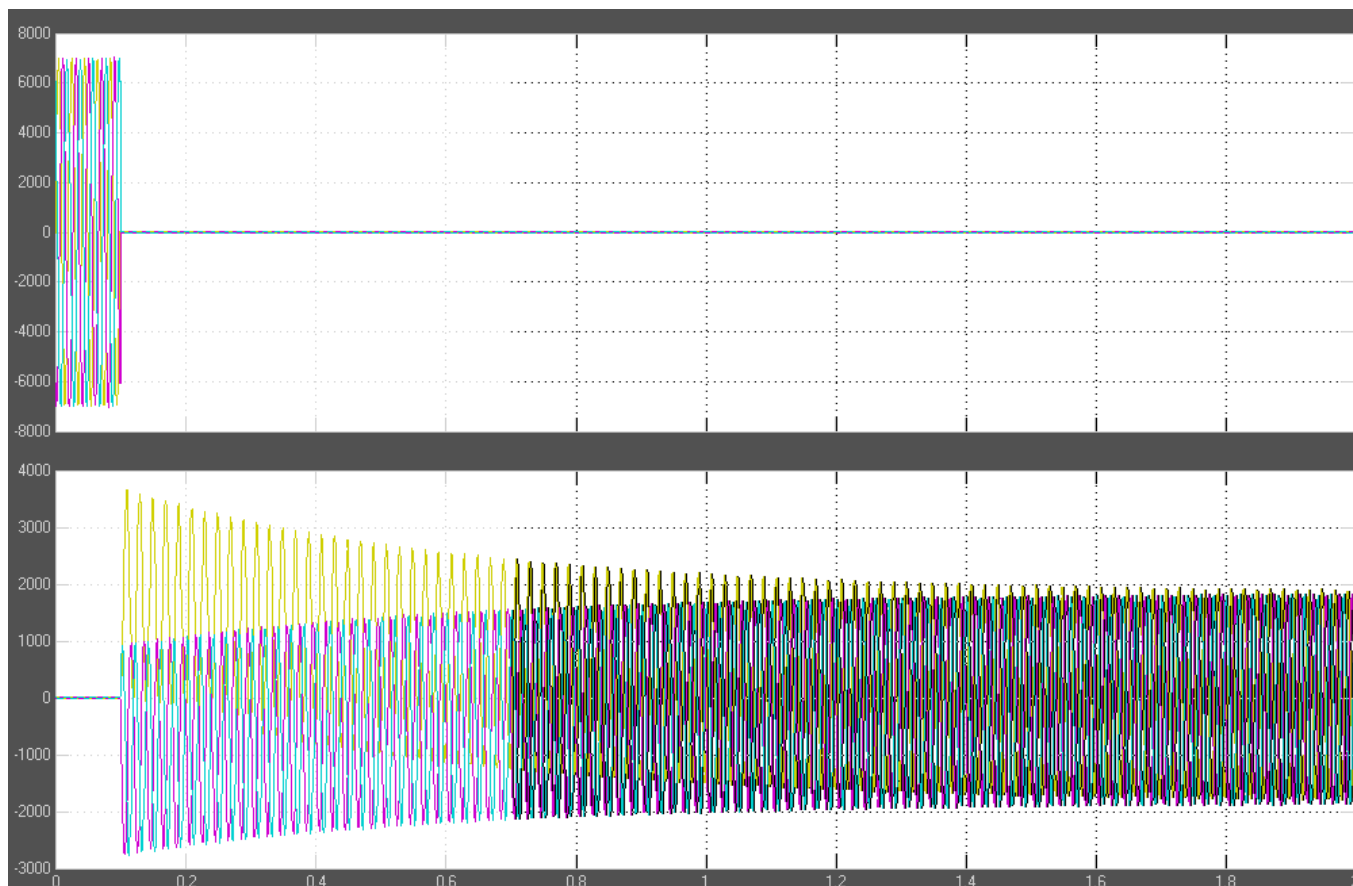


Рисунок 14 - Залежності напруги в точці к.з. і струму в гілці ЕРС СД від часу

Одержання дані під час моделювання й розрахунку занесемо в порівняльну таблицю 16.

Таблиця 16- Порівняння отриманих даних

Пар аметр	Розрахункові дані		Моделюв.
	(и. е)	(о. е)	
$I_{п.си}$ с,А	3894,3	3898,66	3973,7
$I_{у.си}$ с,А	6398,514	6560,92	6338,6
$I_{п.г.}$ А	8671,7	8684,4	8946,5

$I_{y,Г,А}$	14115,7	14237,39	13984,5
$I_{п.сд, А}$	1514,8	1515,49	1583,4
$I_{y.сд, А}$	4148,9	4151,64	3955,7
$I_{п.н, А}$	2113,4	2112,43	2211,3
$I_{y.н, А}$	4931,845	4927,7	4853,7

Розрахувавши струми трифазного короткого замикання у всіх необхідних точках занесемо отримані результати в таблицю 17 і побудуємо графік залежності розподілу величини струму к.з. від електричної далекості системи до точки к.з.

Таблиця 17 - Результати розрахунків трифазних к.з. у мережі вище 1кв

Параметр/ точка к. з.	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$I_{п,А} (i.e)$	6682,574	10005,664	1975,565	2928,471	18082,399	16194,19
$I_{п,А} (o. e)$	6683,810	10021,307	1977,828	2930,406	18209,201	16211,014
$I_{y,А} (i.e)$	18645,354	16581,566	2206,684	3629,654	23096,670	29605,014
$I_{y,А} (o. e)$	18603,755	16611,922	2211,842	3632,694	23335,846	29877,657
$I_{п(t1),А} (i.e)$	—	—	—	—	—	14185,023
$I_{п(t1),А} (o. e)$	—	—	—	—	—	14202,356
$I_{п(t2),А} (i.e)$	—	—	—	—	—	13550,646
$I_{п(t2),А} (o. e)$	—	—	—	—	—	13568,164
$S_{к.з. МВА} (i.e)$	445,042	109,181	126,606	187,673	197,314	176,709
$S_{к.з. МВА} (o. e)$	445,320	109,352	126,751	187,797	198,697	176,893

Побудуємо графік залежності розподілу величини струму к.з. від електричної далекості системи до точки к.з. Для побудови графіка значення струму й опір приведемо до щабля напруги 115 кв.

Таблиця 18 - Дані для побудови графіка.

Точка к. з.	$I_{\text{привед.}}, \text{ A}$	$Z_{\text{привед.}}, \text{ Ом}$
К1	6427,423	10,332
К2	390,708	169,936
К3	468,038	141,862
К4	422,508	157,145
К5	257,989	257,236
К6	213,342	311,216

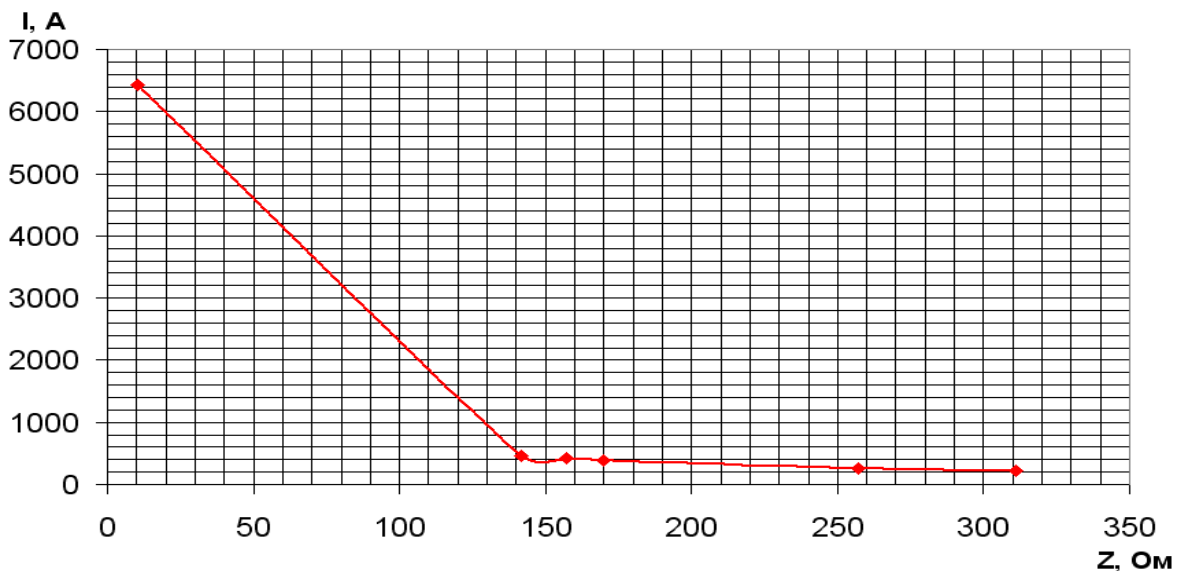


Рисунок 15 - Графік залежності розподілу величини струму к.з. від електричної далекості системи до точки к.з.

При розрахунку короткого замикання на шині 8 при обліку всі можливих факторів вважаємо, що дана шина в кожному з випадків живиться при включеному тільки одному вимикачі. Приведемо схеми заміщення для наступних випадків:

-Включений В3 (виключені В5, В7, В11)

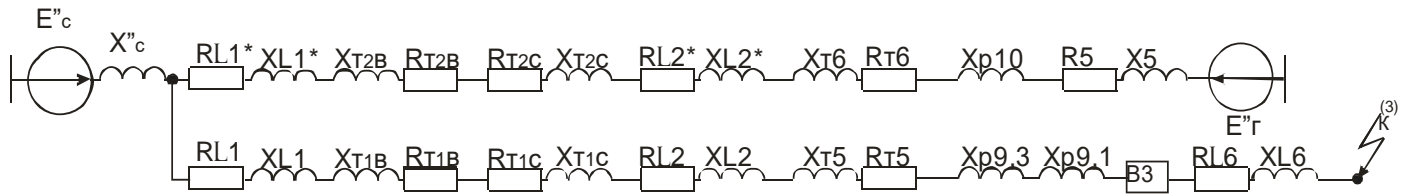


Рисунок 16 - Схема заміщення мережі при включеному вимикачі В3

-Включений В5 (виключені В3, В7, В11)

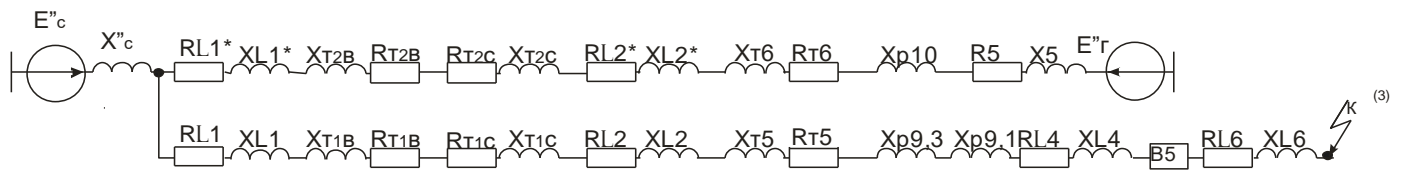


Рисунок 17 - Схема заміщення мережі при включеному вимикачі В5

-Включений В7 (виключені В3, В5, В11)

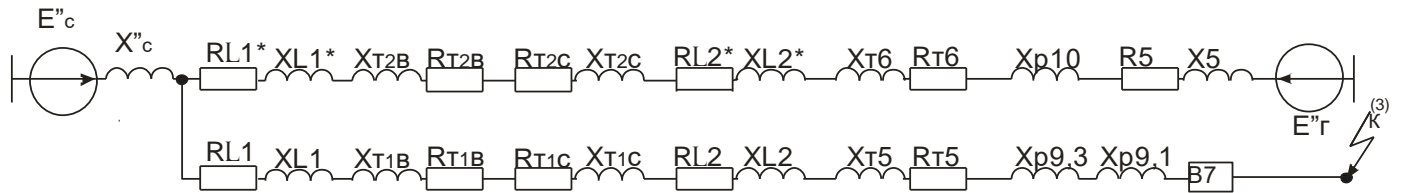


Рисунок 18 - Схема заміщення мережі при включеному вимикачі В7

Випадок коли включений В11 (виключені В3, В5, В7), розглянутий вище.

Після розрахунків зрівняємо значення струму к.з. при всіх можливих факторах на шині 8 і занесемо результати в таблицю.

Таблиця 19 - Значення струмів к.з. при врахуванні всіляких факторів

Параметр	Номер включеного вимикача			
	B3	B5	B7	B11
$I_{п,А} (i.e)$	5975,165	5571,645	7001,654	16194,19
$I_{п,А} (o. e)$	5984,589	5571,881	7002,606	16211,014

5.7. Розрахунок несиметричних струмів к.з.

Розрахунок двофазного короткого замикання на шині 8

Оскільки розрахунки проводимо наближеними методами, то можемо прийняти що опори всіх елементів системи прямій і зворотної послідовностей рівні.

Тому що при двофазному короткому замиканні струми нульової послідовності не мають шляхи протікання, то струм $I^{(2)}$ знайдемо з наступної формули:

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3} * I_{п(1,5)}^{(2)}}{2};$$

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3} * 16194,19}{2} = 14024,58 \text{ А}$$

Розрахунок однофазного замикання на землю.

Струм замикання на землю для мережі із КЛ можна визначити по формулі:

$$I_{3\Sigma} = \sum_{i=1} \frac{(95 + 2,84 \cdot g_i) \cdot U_{\text{ном}} \cdot l_i}{(2200 + 6 \cdot g_i)}; \text{ де } U_{\text{ном}} - \text{ номінальна лінійна напруга мережі, кВ;}$$

l_i - довгий КЛ, км; g_i - перетин кабелю.

У нашому випадку замикання на землю відбувається на шині 8. При розрахунку потрібно враховувати всі кабельні лінії, які пов'язані із точкою замикання. У випадку, коли точку замикання й лінію розділяє реактор або трансформатор, те цю лінію при розрахунку не враховують. Ураховують наступні лінії: L6, L20-L23.

$$I_{3\Sigma} = \frac{(95 + 2,84 \cdot 150) \cdot 6,3 \cdot 1,25}{(2200 + 6 \cdot 150)} + \frac{(95 + 2,84 \cdot 70) \cdot 6,3 \cdot 0,95}{(2200 + 6 \cdot 70)} + \frac{(95 + 2,84 \cdot 70) \cdot 6,3 \cdot 0,90,46}{(2200 + 6 \cdot 70)} +$$

$$+ \frac{(95 + 2,84 \cdot 70) \cdot 6,3 \cdot 0,9}{(2200 + 6 \cdot 70)} + \frac{(95 + 2,84 \cdot 70) \cdot 6,3 \cdot 1,34}{(2200 + 6 \cdot 70)} = 3,903 \text{ А}$$

5.8. Розрахунок КЗ у системі до 1 кВ

При розрахунках струмів КЗ в електроустановках змінного струму напругою до 1 кВ допускається:

1) використати спрощені методи розрахунків, якщо їхня погрішність не перевищує 10 %;

2) максимально спрощувати й еквівалентувати всю зовнішню мережу стосовно місця КЗ й індивідуально враховувати тільки автономні джерела електроенергії й електродвигуни, що безпосередньо примикають до місця КЗ;

3) не враховувати вплив синхронних й асинхронних електродвигунів або комплексного навантаження, якщо їх сумарний номінальний струм не перевищує 1,0 % початкового значення періодичної складової струму в місці КЗ, розрахованого без обліку електродвигунів або комплексного навантаження.

Схема заміщення виглядає так:

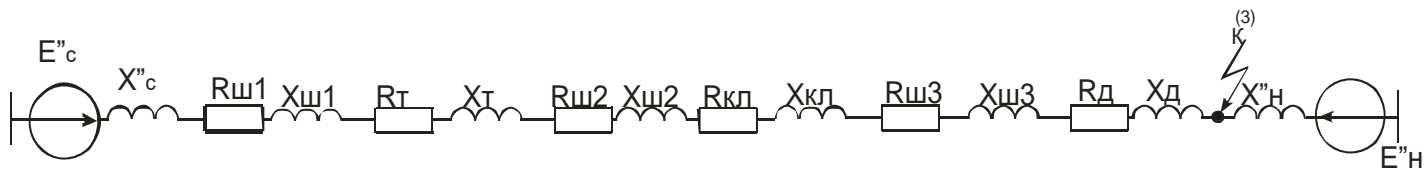


Рисунок 19 - Схема заміщення для точки КЗ.

При розрахунку будемо вважати, що понижуючий трансформатор ТЗ живиться від системи, що має індуктивний опір X_c і незмінну по амплітуді напругу, а також потужність, яку ми можемо розрахувати в еквіваленті від потужності основної системи. Тоді:

$$S_c = \frac{S_{осн.с} \cdot S_T}{S_{т.осн}} = \frac{320 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 21 \cdot 10^6 \text{ МВА} , \quad \text{де } S_T - \text{мощність}$$

понижуючого трансформатора; $S_{т.осн}$ - потужність трансформатора Т1 або Т2; $S_{осн.с}$ - потужність основної системи.

Тип шини перед трансформатором ШРА-73, після трансформатора ШМА-73

$$\mathbf{G_{ш1} = 0,2 \text{ мОм} \quad X_{ш1} = 0,1 \text{ мОм} \text{ ([1] табл. 5.3) } \mathbf{G_{ш2,3} = 0,031 \text{ мОм} \quad X_{ш2,3} = 0,017 \text{ мОм}}$$

При наближеному розрахунку активних опорів різних контактів і контактних сполук можемо взяти ([2] п 6.2.4) рівним:

$R_{к.с} = 0,1 \text{ мом}$, де $R_{к.с}$ - активний опір контактних сполук кабелів.

$$\mathbf{G_{к.л} = \frac{0,097 \cdot 50}{5} = 0,97 \text{ Ом} \quad X_{к.л} = 0,73 \text{ Ом}}$$

Великий вплив на струм к. з у мережі до 1 кв має активний опір дуги
Рдуги

при наших умовах $R_{дуги} = 4 \text{ мОм}$ ([1] табл. 5.9)

Опорів котушок роз'єднувачів контактних автоматичних вимикачів

$$R_p = 1,3 \text{ МОМ} \quad X_p = 0,7 \text{ МОМ.}$$

Знайдемо сумарний опір контактних сполук, автоматичних вимикачів і дуги при к.з.

$$U_B = 6,3 \text{ кВ}; \quad U_H = 0,4 \text{ кВ.}$$

$$Z_d = R_{к.с} + R_{дуги} + R_p + X_p = 0,1 + 4 + 1,3 + j0,7 = 5,4 + j0,7 \text{ МОМ}$$

$$E''_c = U_B \cdot \frac{U_H}{U_B} = U_H = 0,4 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$X_c = \frac{U_B^2}{S_c} \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = \frac{U_H^2}{S_c} = \frac{0,4^2}{21} = 7,619 \text{ МОМ}$$

$$G_{ш1} = G_{ш1} \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 0,2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{0,4}{6,3} \right)^2 = 0,001 \text{ МОМ}$$

$$X_{ш1} = X_{ш1} \cdot \left(\frac{U_H}{U_B} \right)^2 = 0,1 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{0,4}{6,3} \right)^2 = 0,0004 \text{ МОМ}$$

Знайдемо опори трансформатора:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{18 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{1,6 \cdot 10^6} = 1,125 \text{ МОМ}$$

$$Z_T = \frac{U_X}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{1,6 \cdot 10^6} = 5,5 \text{ МОМ}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,125^2} = 5,384 \text{ Ом}$$

Опори шин:

$$G_{ш2} = G_{ш3} = 0,031 \text{ МОМ}$$

$$X_{ш2} = X_{ш3} = 0,017 \text{ МОМ}$$

Опори кабельної лінії:

$$G_{к.л} = \frac{G_0 \cdot l}{N} = \frac{0,097 \cdot 0,05}{5} = 0,97 \text{ МОМ}$$

$$X_{к.л} = \frac{X_0 \cdot l}{N} = \frac{0,073 \cdot 0,05}{5} = 0,73 \text{ МОМ}$$

Для змішаного навантаження:

При розрахунках струмів КЗ варто враховувати вплив кожного комплексного навантаження, якщо струм у місці КЗ від того навантаження становить не менш 5 % токи в місці КЗ, певного без врахування навантаження.

$$E''_{H*} = 0,25 \text{ (о. е)} \quad X''_{H*} = 0,35 \text{ (о. е)} \quad ([3] \text{ п } 2.4. 3)$$

$$X_H = X_{H*} \cdot \frac{U^2_{CP.OCH}}{S_{НОМ}} = 0,35 \cdot \frac{0,4^2 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 10^6} = 50,91 \text{ МОм}$$

$$E_H = E_{H*} \cdot U_{CP.OCH} = 0,85 \cdot 0,4 \cdot 10^3 = 340 \text{ Ом}$$

Знайдемо складову струму к.з від системи

$$R_{\Sigma C} = R_D + R_{M1} + R_{M2} + R_T + R_{M3} + R_{K.L} = 5,4 + 0,001 + 1,125 + 0,031 + 0,97 + 0,031 = 7,56$$

МОм

$$X_{\Sigma C} = X_C + X_{M1} + X_T + X_{M2} + X_{M3} + X_{K.L} + X_D = 7,62 + 5,384 + 0,017 + 0,73 + 0,017 + 0,7 = 14,47$$

МОм

$$I_C = \frac{E_C}{\sqrt{3} \cdot Z_C} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 16,32 \cdot 10^{-3}} = 14148,4 \text{ А}$$

$$Z_C = \sqrt{X_{\Sigma C}^2 + R_{\Sigma C}^2} = 16,32 \text{ МОм}$$

$$Z_H = \sqrt{X_H^2 + R_{ДУГИ}^2} = 4 \text{ МОм}$$

$$I_H = \frac{E_H}{\sqrt{3} \cdot Z_H} = \frac{340}{4 \cdot \sqrt{3}} = 49 \text{ А.}$$

Знайдемо потужність короткого замикання в мережі до 1 кв:

$$I_{\Pi} = I_C + I_H = 14148,4 + 49 = 14197,47 \text{ А}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{\Pi} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 14197,47 = 9,8363 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

5.9.Висновки

У курсовому проекті ми використали й закріпили свої навички в розрахунках струмів короткого замикання, які є невід'ємною частиною процесів, що відбуваються в наших мережах. Струми короткого замикання є

негативними факторами в електричних мережах, тому що вони порушують структуру мережі, ведуть до поломок дорогого встаткування, і навіть до масштабних аварій, у результаті яких гине значна кількість людей.

Для того, щоб уникнути цих неприємностей, ми, як майбутні інженери, повинні навчитися управляти перехідними процесами, що відбуваються в нашій мережі, а значить ми повинні вміти їх розраховувати. Дослідження й розрахунки перехідних процесів є однією з необхідних умов рішення багатьох завдань, що виникають при проектуванні й експлуатації систем електропостачання.

Дана курсова робота дала нам можливість відчутти, які ж все-таки процеси, відбуваються в мережах, близьких по своїй структурі до реальних, і це є позитивним плюсом у розвитку кругозору студентів по своїй майбутній спеціальності.

Цей проект вимагає не тільки знань одних перехідних процесів, він змушує студентів показати свої вміння об'єднати в одне ціле їхнього пізнання в області релейного захисту, електричних апаратів, електричних машин, мереж і систем, постачання, надійності, економіки, і інших серйозних наук.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ІЕС 60909-4:2008 Струм короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання (ІЕС TR 60909-4:2000, ІДТ).
2. РД 153–34.0–20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования : руководящие указания /под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
3. Бобров, А. Э. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / А. Э. Бобров, А. М. Дяков, В. П. Зорин. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 127 с.
4. Зорин В.В. Системы электроснабжения общего назначения / Зорин В.В., Тисленко В.В. – Чернигов : ЧГТУ, 2005. – 341 с.
5. Методические указания и контрольные задания по курсу «Переходные процессы в системах электроснабжения». –К.:КПИ, 1986. – 60с.
6. Методичні вказівки та завдання до виконання курсової роботи з дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці» Для студентів напряму підготовки 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології». – К.: НУБІП, 2010. – 49 с.
7. Перехідні процеси в енергетиці : [Навчальний посібник] / В.В. Козирський, О.В. Гай. – К. : ЦП «Компринт», 2016. – 489 с.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред.Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.
9. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергия, 2007. – 288 с.
10. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам / Ульянов С.А. – М.: Энергия, 1968. – 387 с.
11. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / Ульянов С.А. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
12. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання: Навч. Посібник. – Х.: Факт, 2005. – 176с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ	6
1.1. Загальні відомості про перехідні процеси.....	6
1.2. Короткі замикання в системах електропостачання.....	7
1.3. Перехідні процеси в обертових машинах при трифазних коротких замиканнях	8
1.4. Перехідні процеси в системі електропостачання при раптових трифазних коротких замиканнях.....	10
1.5. Практичні методи розрахунку струмів трифазного короткого замикання	11
1.6. Основні положення при дослідженні несиметричних перехідних процесів	13
1.7. Однократна поперечна несиметрія	14
1.8. Однократна поздовжня несиметрія й складні види ушкоджень	15
1.9. Короткі замикання в особливих умовах.....	16
1.10. Рівень струмів короткого замикання	17
РОЗДІЛ 2. ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЇЇ ВИКОНАННЯ	18
2.1. Загальні положення	18
2.2. Процес короткого замикання.....	19
2.3. Побудова розрахункової схеми й схеми заміщення.....	23

2.4. Опір елементів схеми заміщення КЗ ланцюга	26
2.5. Визначення результуючого опору схеми заміщення і струморозподілу в елементах системи електропостачання.....	29
2.6. Розрахунок струмів трифазного КЗ у вказаних точках системи електропостачання	31
2.7. Врахування електродвигуна при розрахунку струмів короткого замикання	35
2.8. Розрахунок режиму несиметричного КЗ у вказаній точці системи електропостачання й побудова векторних діаграм струмів і напруг у точці несиметричного КЗ	38
РОЗДІЛ 3 ЗАВДАННЯ	40
РОЗДІЛ 4 Приклад оформлення.....	55
4.1. Розгляд вихідних даних проєкта	55
4.2. Розрахунок точок короткого замикання.....	64
4.3. Розрахунок струмів КЗ в різні проміжки часу	83
4.4. Розрахунок струмів К.З. в мережі до 1кВ	85
4.5. Розрахунок несиметричних КЗ.....	89
4.6. Розрахунок струмів замикання на землю	92
4.7. Електродинамічна стійкість та перевірка на термічну стійкість .	94
4.8. Математичне моделювання електричної системи в Elplek	96
4.9. Висновок	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155