

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Методичні вказівки

до самостійної роботи та до виконання розрахунково-графічної роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії та
інформаційно-вимірювальних
технологій
Протокол №5
від 18.05.2023 року

Чернігів 2023

Перехідні процеси в електричних системах. Методичні вказівки до самостійної роботи та до виконання розрахунково-графічної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»./ Укл.: Бодунов В.М., Кулько Т.В., Приступа А.Л. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 26 с.

Укладачі: Бодунов Вадим Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій НУ «Чернігівська політехніка»;
Кулько Тетяна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій НУ «Чернігівська політехніка»;
Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій НУ «Чернігівська політехніка».

Відповідальний за випуск: Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій НУ «Чернігівська політехніка».

Рецензент: Ревко Анатолій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та механотроніки НУ «Чернігівська політехніка».

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП	4
1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ	5
1.1 Загальні відомості про перехідні процеси	5
1.2 Аналіз перехідних процесів при трифазних коротких замиканнях	5
1.3 Аналіз перехідних процесів при порушенні симетрії у трифазній мережі	5
1.4 Поздовжня несиметрія та складні види пошкоджень.....	5
1.5 Методи оцінки статичної стійкості електроенергетичних систем.....	5
1.6 Методи оцінки динамічної стійкості електроенергетичних систем ...	6
1.7 Асинхронні режими в електричних мережах. Покращення стійкості електричних мереж	6
2 РЕКОМЕНДОЦІЇ ЩОДО СТРУКТУРИ ЗВІТУ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	7
3 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ РОБОТИ.....	8
3.1 Особливості оформлення розрахунково-графічної роботи	8
3.2 Процедура захисту розрахунково-графічної роботи	8
4 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	9
4.1 Формування розрахункових умов короткого замикання	9
4.2 Початкові положення до розрахунку струмів короткого замикання	10
4.3 Визначення результуючого опору схеми заміщення і струморозподілу в елементах системи електропостачання	10
4.4 Розрахунок несиметричних коротких замикань	13
5 ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ	20
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	26

ВСТУП

Згідно з Положенням «Про організацію навчального процесу у вищих навчальних закладах» самостійна робота студента є основним засобом оволодіння навчальним матеріалом у час, вільний від обов'язкових навчальних занять.

В процесі викладання навчального матеріалу засвоюється 15 відсотків інформації, що сприймається на слух, 65 відсотків – слух і зір. Якщо навчальний матеріал опрацьовується власноручно, самостійно (індивідуально) виконується завдання від його постановки до аналізу отриманих результатів, то засвоюється не менше 90 відсотків інформації.

Самостійна робота, як складова навчальної діяльності здобувача спрямована на формування самостійності студентів і отримання або підсилення отриманих раніше загальних та фахових компетентностей, а також отримання програмних результатів навчання, передбачені освітньою програмою зі спеціальності.

Вивчення лекційного матеріалу та матеріалу, відведеного на самостійне засвоєння, закріплюється під час виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Перехідні процеси в електричних системах» шляхом набуття та закріплення практичних навичок щодо розрахунків електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах та системах. В методичних вказівках викладено основні моменти теоретичних питань, які виносяться на самостійну роботу та перелік рекомендованої літератури. Також наведено узагальнену структуру розрахунково-графічної роботи, вимоги до її оформлення та захисту, наведено зразок завдання. Знання, набуті під час вивчення дисципліни «Перехідні процеси в електричних системах», будуть використані студентами при вивченні дисциплін «Електричні апарати», «Електричні системи та мережі», «Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем», а також в курсовому та дипломному проектуванні.

1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

1.1 Загальні відомості про перехідні процеси

Причини виникнення перехідних процесів. Види коротких замикань. Призначення розрахунків перехідних процесів, розрахункові умови. Початкові положення до розрахунку струмів к.з. Розрахункова схема системи електропостачання та опис її елементів. Схема заміщення та способи визначення показників її елементів. Еквівалентні перетворення схем заміщення. Математичні моделі машин змінного струму

1.2 Аналіз перехідних процесів при трифазних коротких замиканнях

Коротке замикання в радіальній мережі без трансформаторних зв'язків. Коротке замикання на затискачах генератора. Коротке замикання у віддалених точках системи електропостачання. Початкове значення періодичної складової струму короткого замикання. Розрахунок аперіодичної складової струму к.з. Розрахунок ударного струму короткого замикання. Періодична складова струму короткого замикання у довільний момент часу перехідного процесу. Струм короткого замикання в усталеному аварійному режимі. Розрахунок складових струму короткого замикання від вузлів навантаження. Розрахунок складових струму к.з від електродвигунів, що перейшли на генераторний режим.

1.3 Аналіз перехідних процесів при порушенні симетрії у трифазній мережі

Особливості підходів до розрахунку несиметричних режимів. Основні положення методу симетричних складових. Розкладання несиметричної системи векторів. Опір елементів зворотної та нульової послідовностей. Схеми заміщення для окремих послідовностей. Урахування перехідного опору в місці короткого замикання. Порівняння струмів при різних видах к.з.

1.4 Поздовжня несиметрія та складні види пошкоджень

Загальні відомості. Обрив однієї фази трифазної мережі. Обрив двох фаз трифазної мережі. Вмикання у фази неоднакових опорів. Подвійне замикання на землю. Короткі замикання в мережах зовнішнього електропостачання. Замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю. Перехідні процеси, обумовлені особливостями технології виробництва. Процеси при комутаціях конденсаторних батарей. Короткі замикання в мережах постійного струму.

1.5 Методи оцінки статичної стійкості електроенергетичних систем

Основні поняття і визначення стійкості. Допущення, що приймаються при аналізі стійкості. Задачі розрахунку стійкості електричних систем. Статична стійкість простої системи. Рівняння руху ротора генератора. Характеристика потужності явнополюсного генератора та генератора з АРВ. Характеристика

потужності при складному зв'язку генератора з системою. Розрахунок власних і взаємних провідностей. Статична стійкість складних систем. Метод малих коливань. Статична стійкість навантаження. Дійсна межа потужності. Статична стійкість двигунів навантаження. Вторинні критерії стійкості навантаження. Нормативні і методичні вказівки по аналізу статичної стійкості.

1.6 Методи оцінки динамічної стійкості електроенергетичних систем

Аналіз динамічної стійкості простої системи графічним методом. Динамічна стійкість при КЗ на лінії. Граничний кут відключення КЗ. Аналіз трифазного КЗ графічним методом. Рішення рівняння руху ротора генератора. Метод послідовних інтервалів. Динамічна стійкість складних систем. Динамічна стійкість асинхронних та синхронних двигунів. Вплив системної автоматики на стійкість.

1.7 Асинхронні режими в електричних мережах. Покращення стійкості електричних мереж

Основні поняття. Виникнення асинхронного режиму. Сталий асинхронний режим. Ресинхронізація генераторів і двигунів. Заходи, засновані на поліпшенні параметрів елементів електричної системи. Додаткові пристрої для підвищення рівня стійкості. Режимні заходи щодо підвищення стійкості

2 РЕКОМЕНДОЦІЇ ЩОДО СТРУКТУРИ ЗВІТУ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Розрахунково-графічна робота має містити такі обов'язкові структурні елементи як титульній аркуш, ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ, ЗМІСТ, основну частину та ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.

У розділі ВСТУП вказується призначення розрахунків перехідних режимів в електричних мережах.

У розділі ФОРМУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ УМОВ основної частини повинно бути обґрунтовано наступне:

- формування розрахункової схеми електричної мережі (відповідно до призначення розрахунку);
- вибір розрахункових точок та видів коротких замикань;
- формування схем заміщення електричної мережі та розрахунок їх параметрів.

Розділ роботи РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ повинен містити вирішення наступних задач:

- розрахунок періодичної складової струму короткого замикання;
- розрахунок ударного струму короткого замикання.

У розділі роботи ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ необхідно запропонувати можливі способи та технічні засоби для обмеження струмів короткого замикання.

3 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ РОБОТИ

3.1 Особливості оформлення розрахунково-графічної роботи

Розрахунково-графічна робота виконується державною мовою з дотриманням вимог ДСТУ 3008:2015.

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

При виконанні розрахунково-графічної роботи розрахунки й перетворення електричних схем необхідно вести послідовно й супроводжувати відповідними поясненнями. 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 короткого замикання засобів обчислювальної техніки рекомендується навести блок-схеми алгоритмів та лістинги програми розрахунку, опис і контрольний приклад розрахунку для однієї із точок короткого замикання.

Розрахунково-графічну роботу необхідно виконувати в часових рамках відповідно до затвердженого графіку виконання роботи, що контролюється викладачем. В разі несвоєчасного виконання розділів підсумкова оцінка може бути знижена.

Повністю оформлена і зброшурована розрахунково-графічна робота перевіряється студентом і підписується ним на титульному аркуші. Після цього вона подається на кафедру для перевірки керівником роботи не пізніше терміну, вказаного у графіку виконання. Після перевірки роботи керівник виносить рішення щодо допуску до захисту або повертає роботу на доопрацювання. При позитивному рішенні керівник робить відповідний запис на титульному аркуші роботи.

3.2 Процедура захисту розрахунково-графічної роботи

Захист розрахунково-графічної роботи проводиться до початку екзаменаційної сесії. Метою захисту є перевірка самостійності виконання студентом розрахунково-графічної роботи, оцінка засвоєння ним виконаної роботи. За результатом захисту студент отримує додаткові бали до балів, набраних протягом семестру. Максимальна кількість балів за розрахунково-графічну роботу визначається в робочій навчальній програмі з дисципліни. Вона залежить від своєчасності виконання роботи та результату захисту. Захист розрахунково-графічних робіт приймається відповідальним за дисципліну викладачем. Результати захисту оголошуються керівником роботи безпосередньо після захисту.

4 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

4.1 Формування розрахункових умов короткого замикання

Відповідно до цільового призначення розрахунку короткого замикання встановлюють *розрахункові умови короткого замикання* - найбільш складні умови, в яких може опинитися елемент електроустановки через різні види к.з. До сукупності розрахункових умов входять: розрахункова схема, розрахункова точка, вид та тривалість короткого замикання.

Розрахункова схема має включати усі синхронні генератори та компенсатори, а також синхронні та асинхронні двигуни, потужністю не менше 100 кВт, якщо між електродвигунами та точкою короткого замикання відсутні струмообмежуючі реактори або силові трансформатори. В еквівалентній схемі заміщення синхронні та асинхронні машини представляються надперехідними опорами та е.р.с. Вихідні значення надперехідних е.р.с. чисельно дорівнюють їх значенням в момент часу безпосередньо перед коротким замиканням.

Розрахунковий струм короткого замикання визначається за обставин можливого пошкодження в такій точці мережі, коли при короткому замиканні апарати та провідники мережі або системи захисту перебувають в найбільш важких, або граничних за чутливістю умовах.

Розрахункова точка (місце) короткого замикання обирається безпосередньо за апаратом (на початку провідника) для отримання мінімального опору для перебігу струму короткого замикання, або (при налаштуванні чутливості захисту) – в найбільш електрично віддаленій точці зони захисту.

В якості розрахункового виду короткого замикання необхідно брати:

- трифазне коротке замикання – при визначенні термічної стійкості апаратів та провідників на всіх ступенях напруги окрім живлення генераторною напругою;
- три- або двофазне коротке замикання – при визначенні термічної стійкості апаратів та провідників на ступені генераторної напруги;
- трифазне коротке замикання – при визначенні електродинамічної стійкості;
- однофазне (або двофазне) коротке замикання – для налаштування чутливості системи захисту в мережах з глухозаземленою (або ізольованою) нейтраллю.

Розрахункова тривалість короткого замикання обирається за допустимою дією на елемент системи електропостачання струмів короткого замикання. Наприклад, при розрахунку термічної стійкості за розрахунковий час приймається сума часу дії основного захисту найближчого до місця короткого замикання та повного часу дії вимикача (включаючи час горіння дуги). При наявності зони нечутливості основного захисту слід враховувати також резервний.

4.2 Початкові положення до розрахунку струмів короткого замикання

Для вирішення більшості задач проектування та експлуатації систем електропостачання допустима деяка похибка у визначенні струмів короткого замикання, значення якої має відповідати цільовому призначенню розрахунку. У спрощених методах, призначених для вибору та перевірки електроутаткування за умов коротких замикань, використовуються наступні припущення:

- джерела, використані в живленні місця короткого замикання, працюють одночасно, з номінальним навантаженням;
- синхронні машини мають автоматичні регулятори напруги чи пристрої для форсування збудження;
- коротке замикання настає в такий момент часу, коли аварійний струм буде мати найбільше значення;
- електрорушійні сили всіх джерел збігаються за кутом, зміною частоти обертання нехтують при тривалості короткого замикання до 0,5 с;
- розрахункова напруга приймається на 5% вище номінальної і обирається за шкалою: 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;
- 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;
- активний опір ланцюга короткозамкненого кола враховується тільки при співвідношенні $r_{рез} \geq 0,3 X_{рез}$ і розраховують лише для визначення міри затухання аперіодичної складової струму короткого замикання;
- не враховують ємнісних провідностей на землю повітряних ліній напругою до 220 кВ та кабельних ліній напругою до 110 кВ;
- всі елементи вважаються симетричними, а несиметрія відбувається лише в місці короткого замикання;
- наближено враховують затухання аперіодичної складової струму короткого замикання в мережі з декількома незалежними контурами.

4.3 Визначення результуючого опору схеми заміщення і струморозподілу в елементах системи електропостачання

Основною задачею при розрахунку режиму короткого замикання є визначення струму в аварійній вітці або у точці короткого замикання. Тому перед розрахунком схему заміщення слід, по можливості, звести до найпростішого вигляду шляхом еквівалентування (рисунок 4.1) з результуючими е.р.с. та опором. Для цього використовують відомі методи перетворень лінійних електричних кіл: еквівалентні перетворення послідовно та паралельно з'єднаних опорів; заміна декількох віток з різними е.р.с. та

опорами, приєднаних до загальної точки, одним еквівалентним джерелом; перетворення трикутника опорів на еквівалентну зірку та навпаки [7].

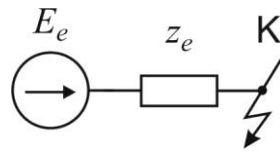


Рисунок 4.1 – Схема заміщення електричної мережі після проведення еквівалентних перетворень

Складну схему заміщення електричної мережі можна спростити до форми багатопроменевої зірки з генеруючими променями, що сходяться в точці короткого замикання. Перетворення виконується з використанням коефіцієнтів струморозподілу. Коефіцієнти струморозподілу характеризують відносну частку кожного джерела у живленні точки короткого замикання [2]. Коефіцієнти струморозподілу обчислюють за відомими з теорії електричних кіл правилами та являють собою аварійні струми в елементах схеми заміщення, що складають частку від загального 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:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{X_{2*}}{X_{1*} + X_{2*}} C \\ C_2 = \frac{X_{1*}}{X_{1*} + X_{2*}} C \\ C = C_1 + C_2 = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

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

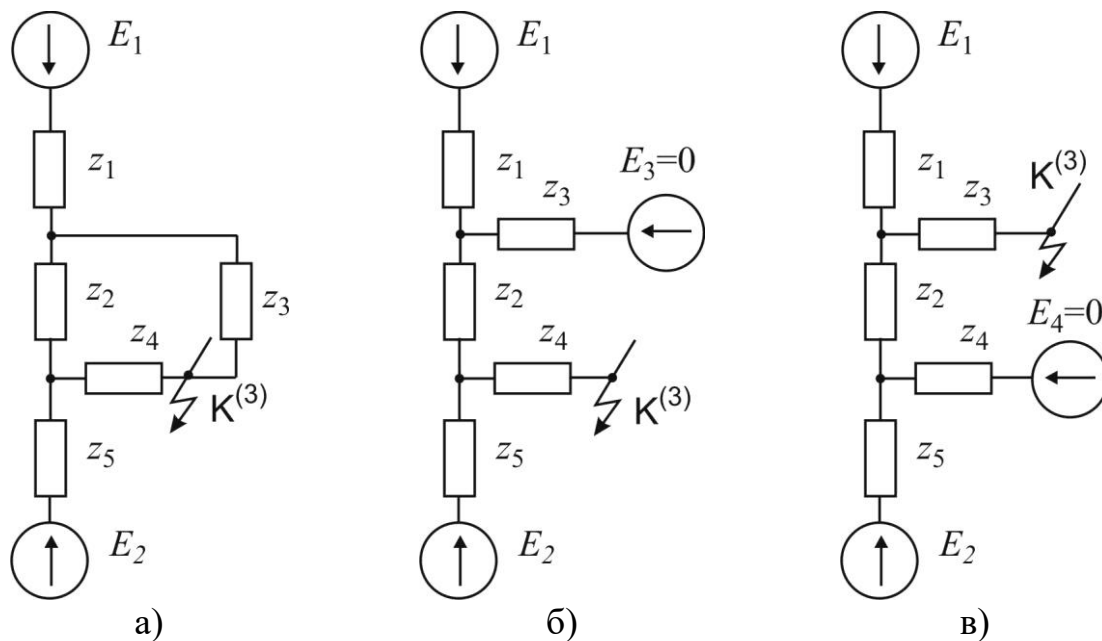
$$0,4 \leq \frac{S_{1 \text{ ном}} \cdot x_{1 \text{ екв}}}{S_{2 \text{ ном}} \cdot x_{2 \text{ екв}}} \leq 2,5, \quad (4.2)$$

де $S_{1 \text{ ном}}, S_{2 \text{ ном}}$ – номінальні потужності джерел;

$x_{1 \text{ екв}}, x_{2 \text{ екв}}$ – еквівалентні опори між відповідним джерелом живлення та точкою короткого замикання

Якщо для джерел не виконується умова (4.2), складові струму короткого замикання від різних джерел розраховуються окремо (за принципом накладання).

Якщо в точці трифазного короткого замикання сходяться декілька віток, наприклад, при короткого замикання на ділянці замкнутого контуру (рисунок 4.2, а), то цей контур можна розрізати, зберігши коротке замикання на кінці кожної вітки. Отриману схему заміщення легко перетворити відносно будь-якої вітки з точкою короткого замикання, враховуючи інші вітки з коротким замиканням, як навантажувальні з е.р.с. рівними нулю (рисунок 4.2, б, в).

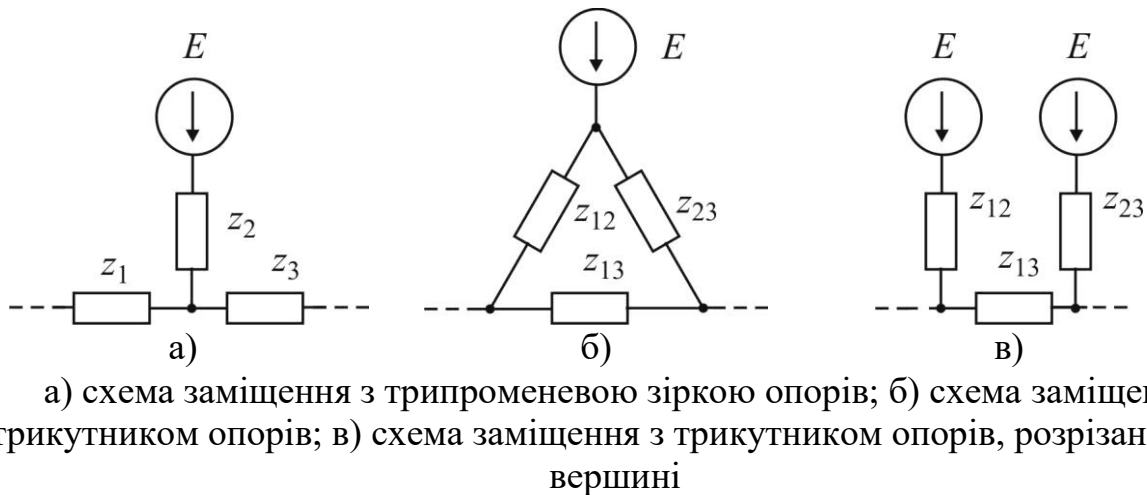


а) вихідна схема заміщення ; б) схема заміщення, перетворена відносно вітки z_4 ; в) схема заміщення, перетворена відносно вітки z_3

Рисунок 4.2 – Схеми заміщення електричної мережі з розрізанням контуру по точці короткого замикання

У випадку, коли схема заміщення симетрична відносно точки короткого замикання, точки схеми з однаковими потенціалами можна з'єднати.

Зменшити кількість вузлів у схемі заміщення з трипроменевою зіркою опорів можна шляхом її заміни на еквівалентний трикутник, з наступним розрізанням по вершині, до якої прикладена е.р.с. (рисунок 4.3, а, б, в).



а) схема заміщення з трипроменевою зіркою опорів; б) схема заміщення з трикутником опорів; в) схема заміщення з трикутником опорів, розрізаним по вершині

Рисунок 4.3 – Схеми заміщення електричної мережі з еквівалентним перетворенням трипроменевої зірки в трикутник

При спрощенні схеми заміщення електричної мережі джерело меншої потужності можна не враховувати, якщо

$$\begin{cases} \frac{x_{1 \text{ екв}}}{x_{2 \text{ екв}}} \geq 20; \\ \frac{S_{1 \text{ ном}}}{S_{2 \text{ ном}}} \leq 0,05. \end{cases} \quad (4.3)$$

4.4 Розрахунок несиметричних коротких замикань

Через появу пошкоджень (несиметричні короткі замикання, обриви фаз) або через неоднаковий опір навантаження фаз трифазної мережі модулі фазних струмів і напруг, а також кути їх взаємного зміщення стають різними за значеннями. Вектори фазних струмів та напруг утворюють несиметричні та невірноважені системи. Такі режими називаються несиметричними режимами. Розрізняють поперечну (будь-який вид несиметричного короткого замикання) та поздовжню несиметрію (розрив однієї або двох фаз чи неоднаковий опір навантаження фаз). Також розрізняють одноразову несиметрію (несиметричне пошкодження лише в одному місці мережі) та складні види пошкоджень (одночасні поздовжня та поперечна несиметрії) [2].

Параметри режиму при цьому слід розраховувати виходячи з схем заміщення для всіх трьох фаз з урахуванням взаємоіндукції між ними, що значно збільшує необхідну кількість рівнянь для опису системи.

Розрахунок струмів несиметричних коротких замикань за [6] рекомендується виконувати з використанням методу симетричних складових. Згідно цього методу будь-яка несиметрична система з трьох векторів може бути представлена у вигляді трьох симетричних систем: прямої, зворотної та нульової послідовності. Це дозволяє користуватися однолінійними схемами заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовності окремо.

Схема заміщення електричної мережі прямої послідовності має містити всі елементи розрахункової схеми електроустановки. Синхронні генератори, синхронні компенсатори, синхронні та асинхронні електродвигуни при розрахунку початкового значення струму несиметричного короткого замикання в схемі заміщення представляються надперехідними е.р.с. та надперехідними опорами, як і при розрахунку трифазних коротких замикань.

При формуванні схеми заміщення зворотної послідовності е.р.с. генераторів приймаються рівними нулю. Опори зворотної послідовності трансформаторів, реакторів, повітряних та кабельних ліній приймаються рівними опорам прямої послідовності. Для складання схеми заміщення нульової послідовності попередньо слід визначити шляхи циркуляції струмів нульової послідовності. При цьому слід керуватися наступним:

- якщо обмотка будь-якого трансформатора з боку точки короткого замикання з'єднана в трикутник або зірку з незаземленою нейтраллю, то сам трансформатор, а також наступні (в напрямку від точки короткого замикання) елементи не потрібно вводити до схеми заміщення нульової послідовності;

- якщо обмотки будь-якого трансформатора з'єднані за схемою "зірка з нулем" – "трикутник", причому обмотка, з'єднана в зірку, знаходиться з боку точки короткого замикання , то до схеми заміщення нульової послідовності потрібно включати лише елементи, які знаходяться між точкою короткого замикання та трансформатором, а також сам трансформатор;

- якщо декілька повітряних ліній одного або різних класів напруг прокладені в одній трасі, то в схемі заміщення нульової послідовності необхідно врахувати взаємоіндукцію між цими лініями.

У наближених розрахунках середні значення співвідношень між індуктивними опорами прямої та нульової послідовності для ПЛ наведені в таблиці 4.1. Опір нульової послідовності для кабелів залежить від способу їх прокладання, наявності, або відсутності металеві оболонки та інших факторів. При наближених розрахунках струмів несиметричних коротких замикань допускається приймати [2]:

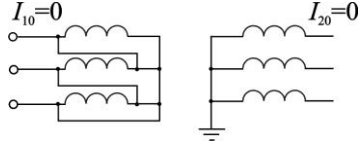
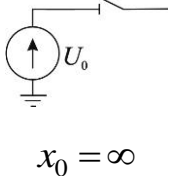
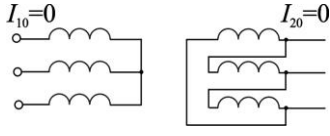
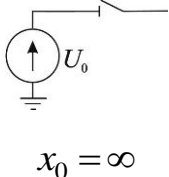
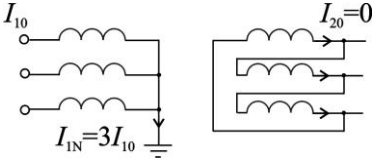
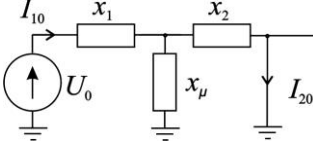
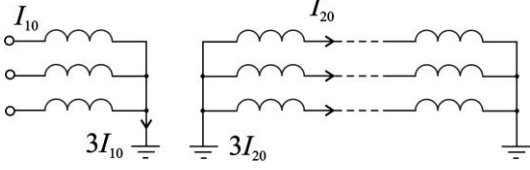
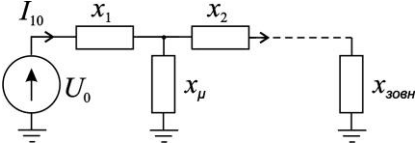
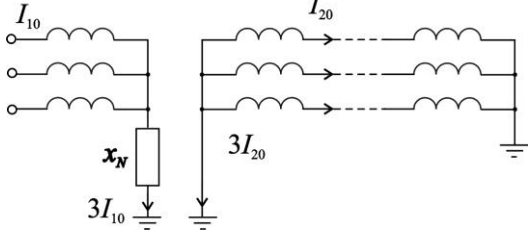
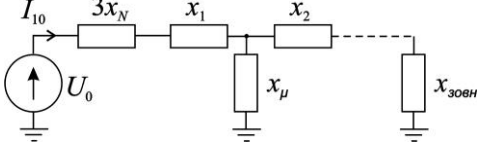
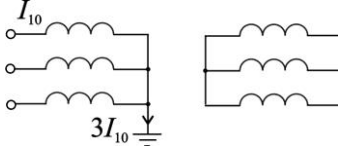
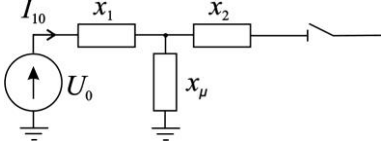
$$\begin{cases} x_0 = (3,5..4,5) \cdot x_1; \\ r_0 = 10 \cdot r_1. \end{cases} \quad (4.4)$$

Таблиця 4.1 – Середні значення x_0/x_1 для повітряних ЛЕП

Характеристика лінії	x_0/x_1
Одноколова ЛЕП 110-220 кВ без тросу	3,5
Те ж із заземленим сталевим тросом	3,0
Те ж із заземленим тросом з матеріалу з високою провідністю	2,0
Двоколова ЛЕП 110-220 кВ без тросів	5,5
Те ж із заземленими сталевими тросами	4,7
Те ж із заземленими тросами з матеріалу з високою провідністю	3,0

На значення опору нульової послідовності трансформаторів впливає конструкція та схема з'єднання обмоток (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Опори нульової послідовності трансформаторів

Схема з'єднання обмоток трансформатора	Схема заміщення/опір нульової послідовності
	 $x_0 = \infty$
	 $x_0 = \infty$
	 $x_0 = x_1 + \frac{x_2 \cdot x_\mu}{x_2 + x_\mu}$
	 $x_0 = x_1 + \frac{(x_2 + x_{30BH}) \cdot x_\mu}{x_2 + x_{30BH} + x_\mu}$
	 $x_0 = 3x_N + x_1 + \frac{(x_2 + x_{30BH}) \cdot x_\mu}{x_2 + x_{30BH} + x_\mu}$
	 $x_0 = x_1 + x_\mu$

Опір нульової послідовності трансформаторів збоку обмотки, з'єднаної трикутником, або зіркою без нульового проводу, незалежно від схеми з'єднання інших обмоток нескінченно великий. Можливість циркуляції струму нульової послідовності при цьому виключена (таблиця 4.2). Струм нульової послідовності буде ненульовим лише при виникненні короткого замикання з боку обмотки трансформатора, з'єднаної зіркою з заземленою нейтраллю.

Для струму прямої послідовності справедливо правило: струм прямої послідовності будь-якого виду несиметричного короткого замикання може бути визначений, як струм умовного трифазного короткого замикання, віддаленого від дійсного місця короткого замикання на додатковий опір $Z_{\Delta}^{(k)}$, який залежить від виду короткого замикання та виражається через опори нульової та зворотної послідовності:

$$\dot{I}_{n1}^{(k)} = \frac{\dot{E}_e}{Z_{1e} + Z_{\Delta}^{(k)}}, \quad (4.5)$$

де $\dot{I}_{n1}^{(k)}$ – струм прямої послідовності особливої фази;

k – вид несиметричного короткого замикання;

\dot{E}_e – результуюча е.р.с. всіх джерел електроенергії;

Z_{1e} – результуючий опір схеми прямої послідовності відносно точки короткого замикання.

Оскільки фазні струми у місці короткого замикання пропорційні струму прямої послідовності особливої фази, модуль періодичної складової струму особливої фази в загальному вигляді дорівнює:

$$\dot{I}_n^{(k)} = m^{(k)} \cdot \dot{I}_{n1}^{(k)}, \quad (4.6)$$

де $m^{(k)}$ – коефіцієнт пропорційності (таблиця 4.4).

Струм трифазного короткого замикання можна розрахувати за правилом еквівалентності для струму прямої послідовності при $m^{(3)} = 1$ та $Z_{\Delta}^{(3)} = 0$.

Таблиця 4.3 – Значення $Z_{\Delta}^{(k)}$ та $m^{(k)}$ для несиметричних коротких замикань

Розрахункова величина	Вид несиметричного короткого замикання		
	однофазне	двофазне	двофазне на землю
$Z_{\Delta}^{(k)}$	$Z_{2e} + Z_{0e}$	Z_{2e}	$\frac{Z_{2e} \cdot Z_{0e}}{Z_{2e} + Z_{0e}}$
$m^{(k)}$	3	$\sqrt{3}$	$\left a^2 - \frac{Z_{2e} + a \cdot Z_{0e}}{Z_{2e} + Z_{0e}} \right $

Приклад Для електричної мережі, зображеної на рисунку 4.4, розрахувати періодичну складову струму короткого замикання, якщо $S_G = 250$ МВА, $E'' = 17,2$ кВ, $x_{*d}'' = 0,19$ в.о., трансформатор має такі параметри: $S_{TH} = 250000$ кВА, $u_{кз} = 11\%$, $k_T = 15,75/115$. Розрахувати періодичну складову струмів однофазного та трифазного коротких замикань використовуючи схему заміщення в іменованих одиницях.

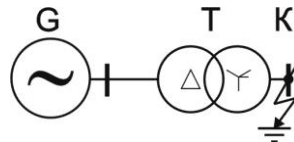
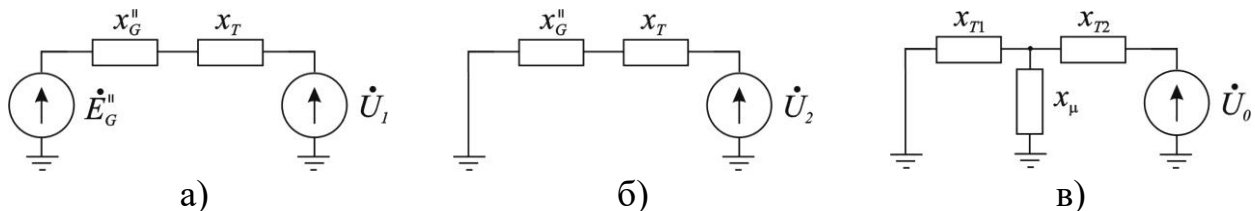


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема електричної мережі

Розв'язок

Схеми заміщення електричної мережі для струмів прямої, зворотної та нульової послідовності зображені на рисунку 4.5 а-в.



а) пряма послідовність; б) зворотна послідовність; в) нульова послідовність
Рисунок 4.5 – Схеми заміщення електричної мережі для струмів

Розрахуємо значення опорів з приведенням їх до основної напруги $U_{осн} = U_2 = 115$ кВ:

$$x_G'' = x_{*d}'' \cdot \frac{U_{осн}^2}{S_G} = 0,19 \cdot \frac{115^2}{250} = 10,05 \text{ Ом};$$

$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{1}{2} x_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_{кз} \cdot U_{осн}^2}{100 \cdot S_{TH}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11 \cdot 115^2}{100 \cdot 250} = 2,91 \text{ Ом};$$

$$x_\mu = \frac{100}{I_{xx}} \cdot \frac{U_{осн}^2}{S_{TH}} = \frac{100}{1,5} \cdot \frac{115^2}{250} = 3527 \text{ Ом}.$$

Еквівалентні опори послідовностей складають:

$$Z_{1e} = Z_{2e} = jx_G'' + jx_T = j(10,05 + 5,82) = j15,87 \text{ Ом};$$

$$Z_{0e} = jx_{T2} + j \frac{x_{T1} \cdot x_{\mu}}{x_{T1} + x_{\mu}} = j2,91 + j \frac{2,91 \cdot 3527}{2,91 + 3527} = j5,82 \text{ Ом.}$$

Е.р.с. генератора, приведена до напруги $U_{осн}$ дорівнює:

$$E_G'' = E'' \frac{U_2}{U_1} = 17,2 \cdot \frac{115}{15,75} = 125,6 \text{ кВ.}$$

Відповідно до правила еквівалентності для струму прямої послідовності його можна визначити за схемою заміщення електричної мережі з додатковим опором $Z_{\Delta}^{(k)}$ (рисунок 4.6). З таблиці 4.3 для однофазного короткого замикання $Z_{\Delta}^{(1)} = Z_{2e} + Z_{0e} = 15,87 + 5,82 = 21,69 \text{ Ом}; m^{(1)} = 3.$

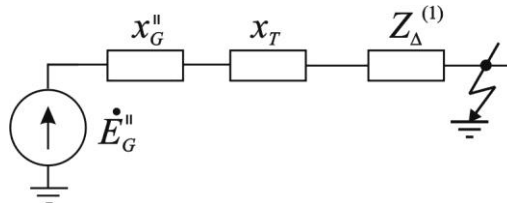


Рисунок 4.6 – Схема заміщення електричної мережі для струму прямої послідовності з додатковим опором $Z_{\Delta}^{(k)}$

Розрахуємо значення струму прямої послідовності

$$I_{n1}^{(1)} = \frac{E_G''}{\sqrt{3}(Z_{1e} + Z_{\Delta}^{(1)})} = \frac{125,6}{\sqrt{3}(15,87 + 21,69)} = 1,93 \text{ кА.}$$

Періодична складова струму короткого замикання особливої фази дорівнює:

$$I_n^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{n1}^{(1)} = 3 \cdot 1,93 = 5,79 \text{ кА.}$$

Схема заміщення електричної мережі для трифазного короткого замикання зображена на рисунку 4.7.

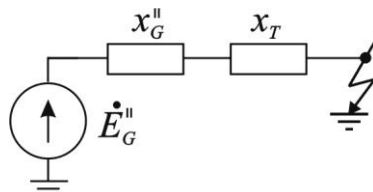


Рисунок 4.7 – Схема заміщення електричної мережі для трифазного короткого замикання

Розрахуємо значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання :

$$I_n^{(3)} = \frac{E_G''}{\sqrt{3} \cdot Z_{1e}} = \frac{125,6}{\sqrt{3} \cdot 15,87} = 4,57 \text{ кА.}$$

5 ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ

Для виконання розрахунково-графічної роботи кожному студенту викладач видає особистий варіант відповідно до таблиць 5.1 –5.3. Згідно з варіантом студенту необхідно виконати наступні пункти:

- скласти схему заміщення фрагменту електричної мережі відповідно до розрахункової схеми (рисунки 5.1–5.8);
- розрахувати параметри схеми заміщення електричної мережі у відносних одиницях;
- визначити розрахункові точки та розрахункові види коротких замикань для вибору та перевірки обладнання електричної мережі за термічною та електродинамічною стійкістю;
- для визначених точок розрахувати:
 - а) величину ударного струму трифазного короткого замикання;
 - б) періодичну складову струму трифазного короткого замикання;
 - в) значення періодичної складової струмів несиметричних коротких замикань (за необхідності);
- розрахувати значення струму замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю (мережа 10 кВ);
- побудувати графіки залежності періодичної складової струму та потужності трифазного короткого замикання від відстані до точки короткого замикання для електричної мережі 35-10 кВ;
- запропонувати способи та технічні засоби обмеження струмів короткого замикання;
- зробити висновки по роботі.

Таблиця 5.1 – Варіанти завдань (мережа 10 кВ)

Рисунок	Варіант				
5.2	1	8	15	22	29
5.3	2	9	16	23	30
5.4	3	10	17	24	31
5.5	4	11	18	25	32
5.6	5	12	19	26	33
5.7	6	13	20	27	34
5.8	7	14	21	28	35

Примітка: мережа 10(6) кВ приєднується до шин НН ПСЗ

Таблиця 5.2 – Марки проводів (кабелів) ділянок електричної мережі 10 кВ

№ варіанту	Марки проводу (кабелю) ділянок										
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁
1-7	АС	АС	АС	АС	АСБ	АСБ	СИП 3	АС	АС	АПВП	АПВП
8-14	ААШВ	ААШВ	ААШВ	АСБ	АС	АС	АС	СИП 3	СИП 3	СИП 3	СИП 3
15-21	АПВП	АПВП	АПВП	АПВП	АПВП	АС	АС	СИП 3	СИП 3	СИП 3	СИП 3
22-28	АС	АС	АС	АС	АПВВ	АПВВ	АПВВ	АС	АС	СИП 3	СИП 3
29-35	АСБ	АСБ	СИП 3	СИП 3	СИП 3	АС	АС	АС	ААБ	ААБ	АС

Примітка: ділянки лінії електропередавання напругою 10 кВ виконані проводом (кабелем) перерізом 70 мм²

Таблиця 5.3 – Варіанти завдань (мережа 110-35 кВ)

Варіант	Потужність КЗ	ПС1		ПС2		ПС3		L _{1,км}	L _{2,км}	L _{3,км}	L _{4,км}
		Параметри трансформаторів		Параметри трансформаторів		Параметри трансформаторів					
		С _с , МВА	Тип	п, шт	Тип	п, шт	U _{кВ}				
1	2100	ТДТН16000/110	2	ТДТН40000/110	2	ТМН4000/35	2	90	72	48	32
2	1700		2	ТДТН10000/110	2	ТМН2500/35	1	70	35	84	28
3	2500	ТДТН40000/110	1	ТДТН40000/110	2	ТМН1000/35	2	84	32	44	17
4	2200	ТДТН16000/110	2	ТДТН40000/110	2	ТМН6300/35	1	110	24	47	14
5	1400	ТДТН10000/110	2	ТМТН6300/110	2	ТМН1600/35	2	150	74	85	37
6	1800	ТДТН25000/110	1	ТДТН10000/110	1	ТМН1000/35	1	130	38	62	42
7	2500	ТМТН6300/110	2	ТДТН40000/110	1	ТМН4000/35	1	165	39	79	21
8	2700	ТДТН16000/110	2	ТДТН6300/110	2	ТМН4000/35	2	100	72	83	37
9	2200	ТДТН8000/110	1	ТМН6300/110	1	ТМН4000/35	1	137	44	27	8,7
10	1100	ТДТН4000/110	2	ТМН2500/110	2	ТМН2500/35	2	153	78	42	12,3
11	800	ТДТН16000/110	2	ТДТН63000/110	2	ТМН1000/35	1	74	70	79	3,8
12	730		2	ТДТН25000/110	1	ТДНС10000/35	1	87	34	89	5,2
13	1100		1	ТМН6300/110	1	ТМН2500/35	2	127	33	98	3,7
14	1800		1	ТДТН40000/110	2	ТДНС16000/35	2	135	100	91	4,2
15	1600	ТМТН6300/110	1	ТДТН16000/110	2	ТМН6300/35	1	157	120	135	6,3
16	1500	ТДТН10000/110	2	ТДТН6300/110	2	ТМН2500/35	2	120	84	38	23
17	2500	ТДТН40000/110	2	ТДТН8000/110	1	ТМН4000/35	1	38	110	48	32
18	1650	ТДТН10000/110	2	ТДТН16000/110	2	ТМН2500/35	2	39	150	84	28
19	2350	ТДТН40000/110	2		2	ТМН6300/35	2	72	130	44	17
20	2200	ТДТН40000/110	2	ТДТН40000/110	1	ТМН6300/35	1	44	165	47	14
21	1960	ТМТН6300/110	2	ТДТН16000/110	2	ТМН1600/35	2	78	100	48	37
22	4000	ТДТН10000/110	1	ТДТН10000/110	2	ТМН1000/35	2	24	90	84	42
23	1000	ТДТН40000/110	1	ТДТН25000/110	1	ТМН4000/35	1	74	70	44	21
24	1300	ТДТН6300/110	2	ТМТН6300/110	2	ТМН4000/35	1	38	84	47	37
25	1500	ТМН6300/110	1	ТДТН16000/110	2	ТМН1000/35	2	39	110	85	8,7
26	1700	ТМН2500/110	2	ТДТН8000/110	1	ТДНС10000/35	2	72	150	62	12,3
27	950	ТДТН63000/110	2	ТДТН4000/110	2	ТМН6300/35	1	44	130	79	3,8
28	800	ТДТН25000/110	1	ТДТН16000/110	2	ТМН1600/35	2	78	165	83	15
29	830	ТМН6300/110	1		2	ТМН1000/35	1	70	100	27	40
30	900	ТДТН40000/110	2		1	ТДНС16000/35	1	34	137	42	32
31	1650	ТДТН16000/110	2		1	ТМН6300/35	2	33	153	79	22
32	2000	ТДТН6300/110	2	ТМТН6300/110	1	ТМН2500/35	2	100	74	89	36

Примітка ЛЕП виконані проводами марки АС-120

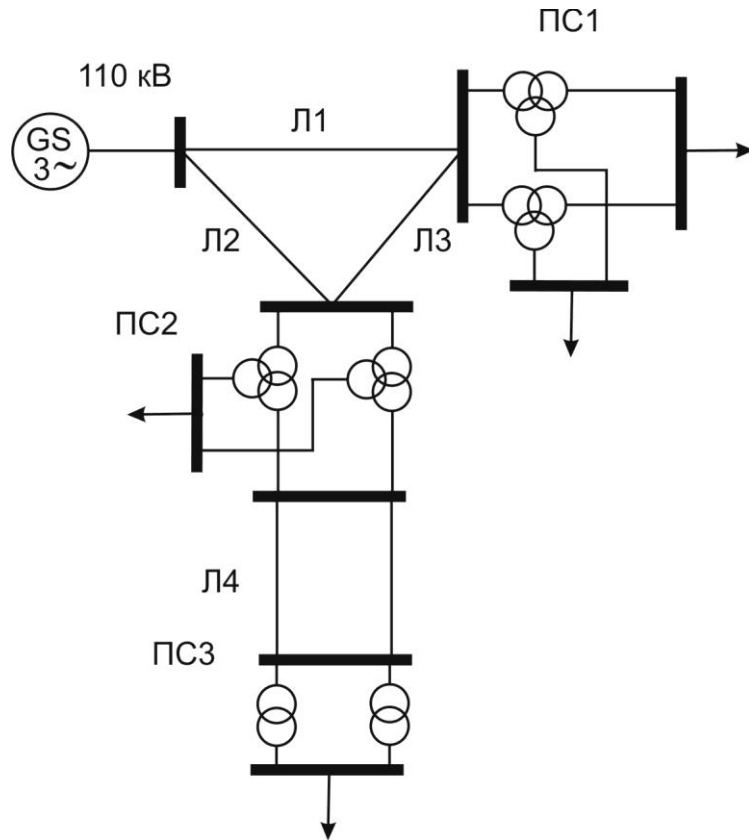


Рисунок 5.1– Електрична мережа напругою 110-35 кВ

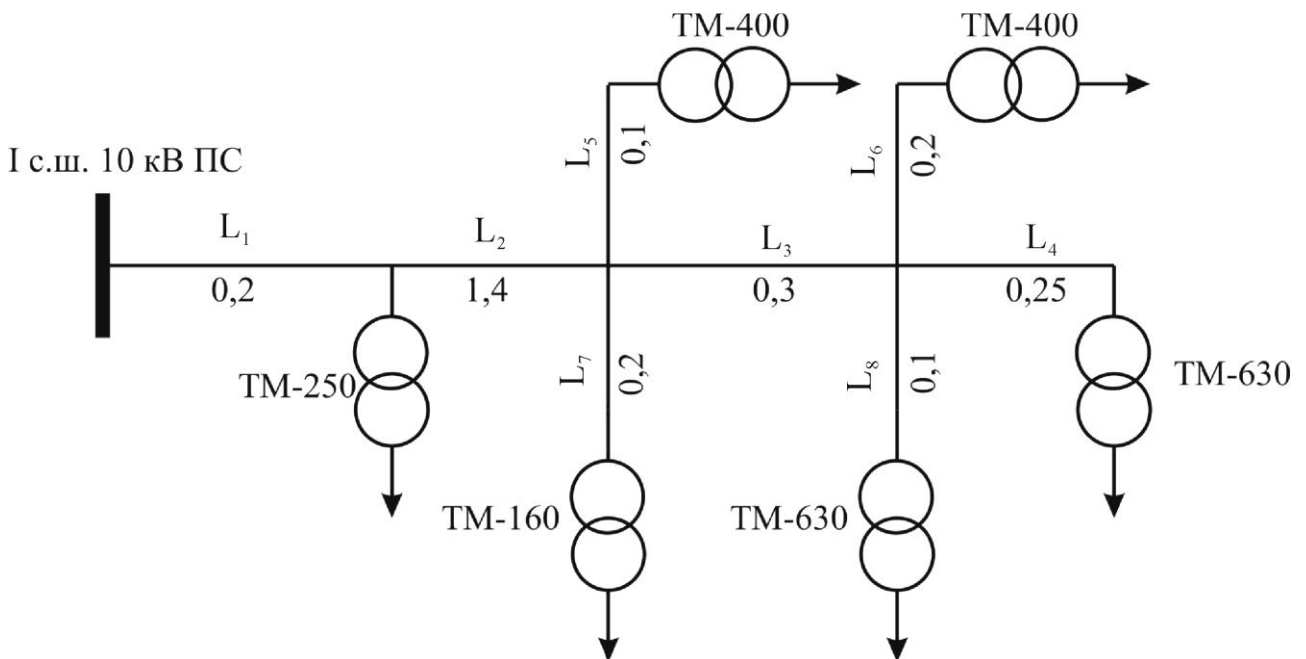


Рисунок 5.2 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

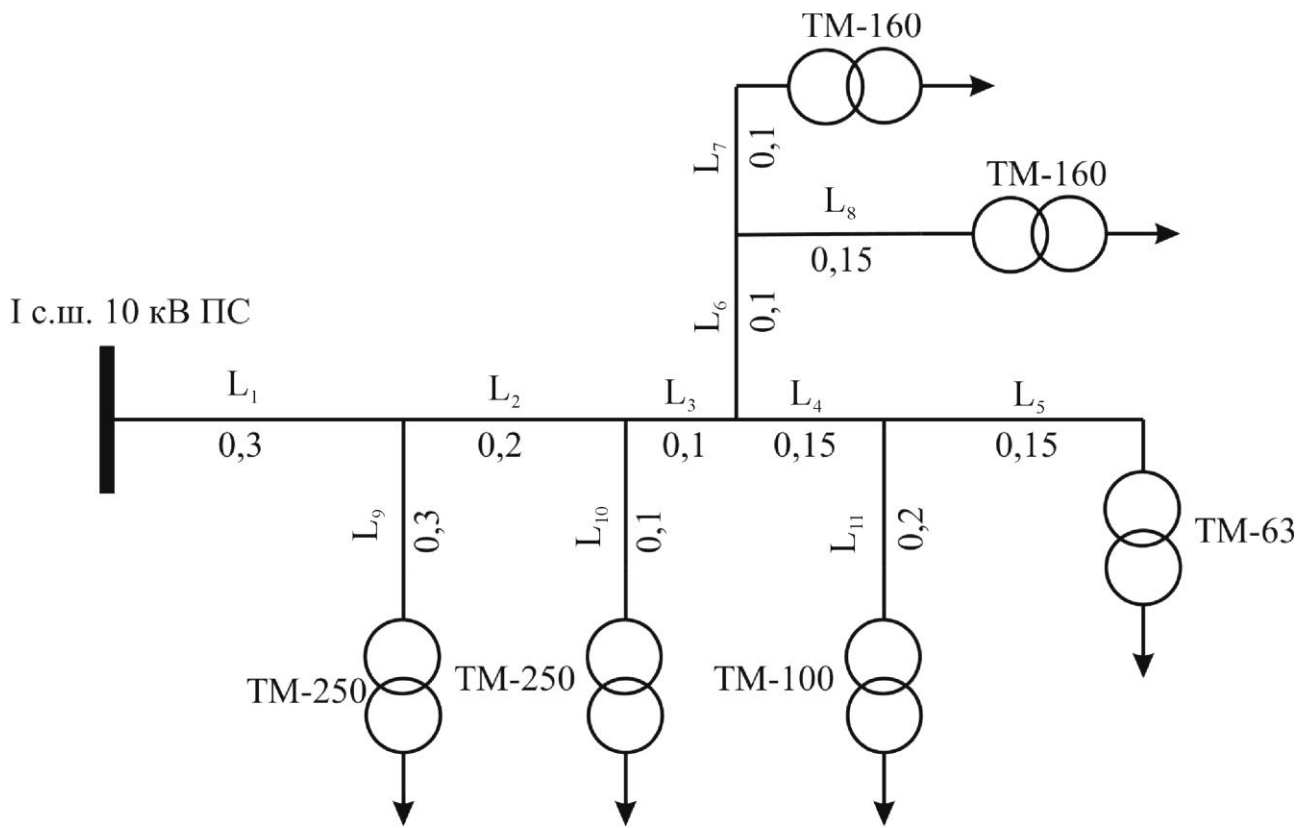


Рисунок 5.3 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

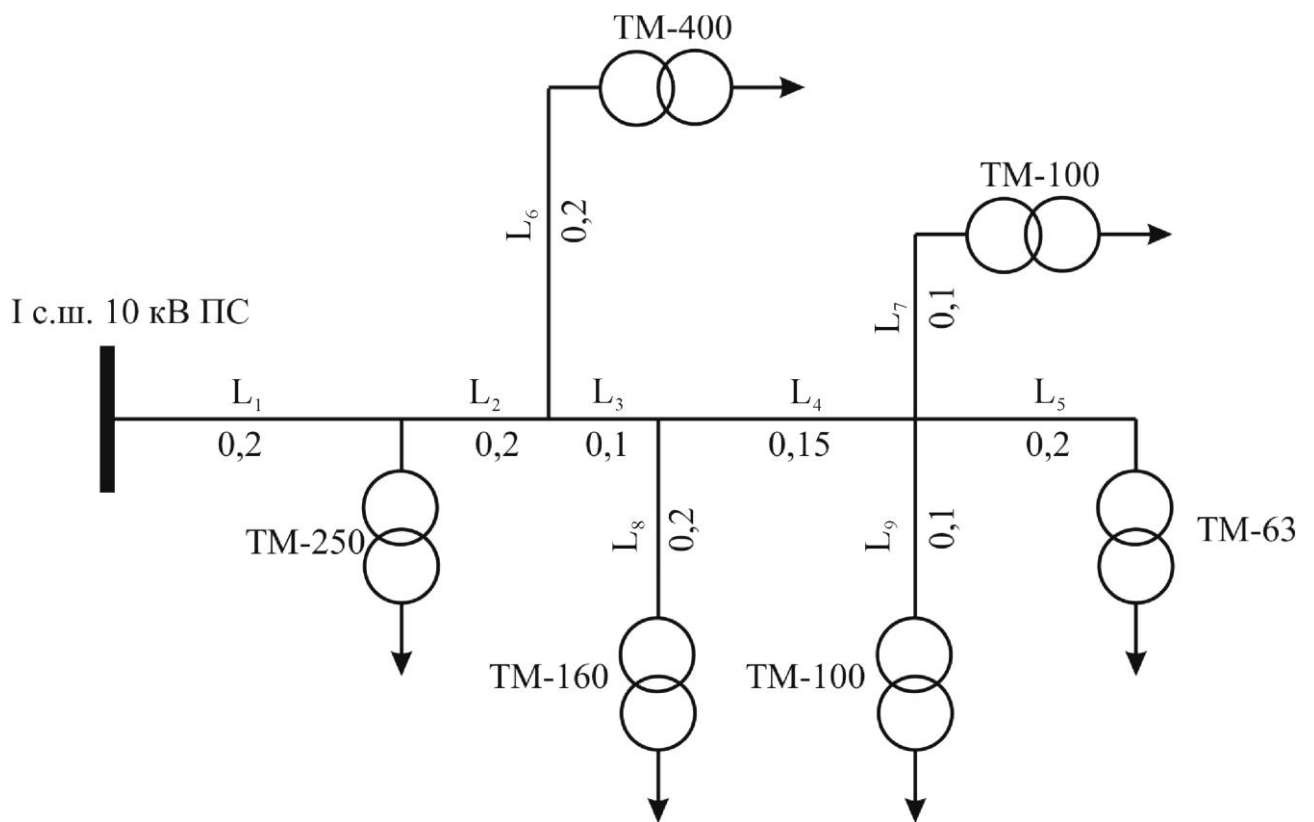


Рисунок 5.4 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

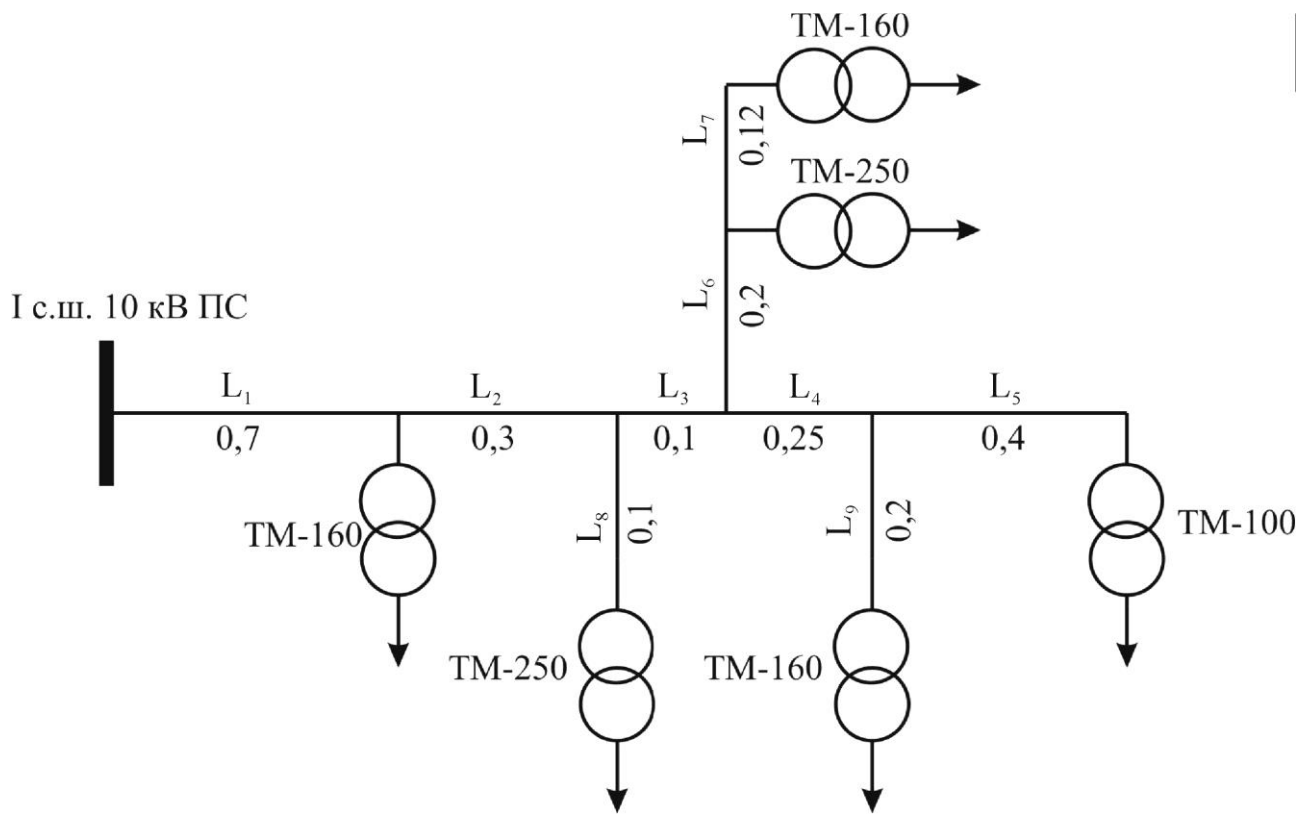


Рисунок 5.5 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

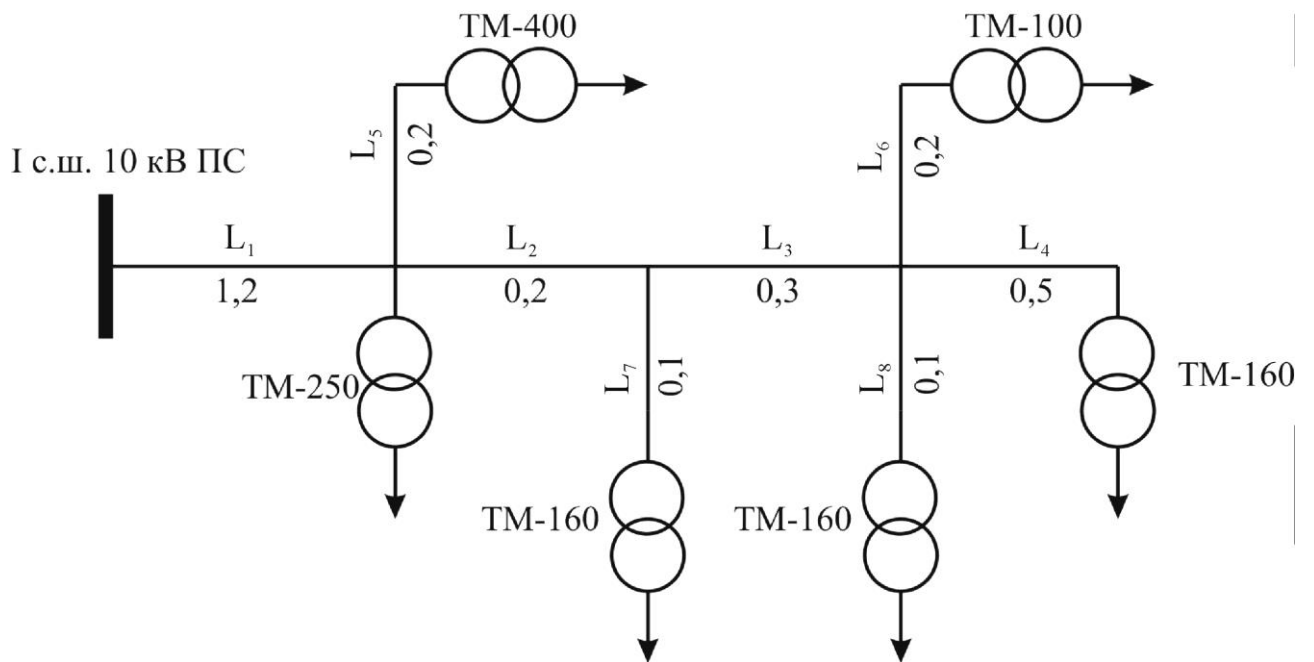


Рисунок 5.6 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

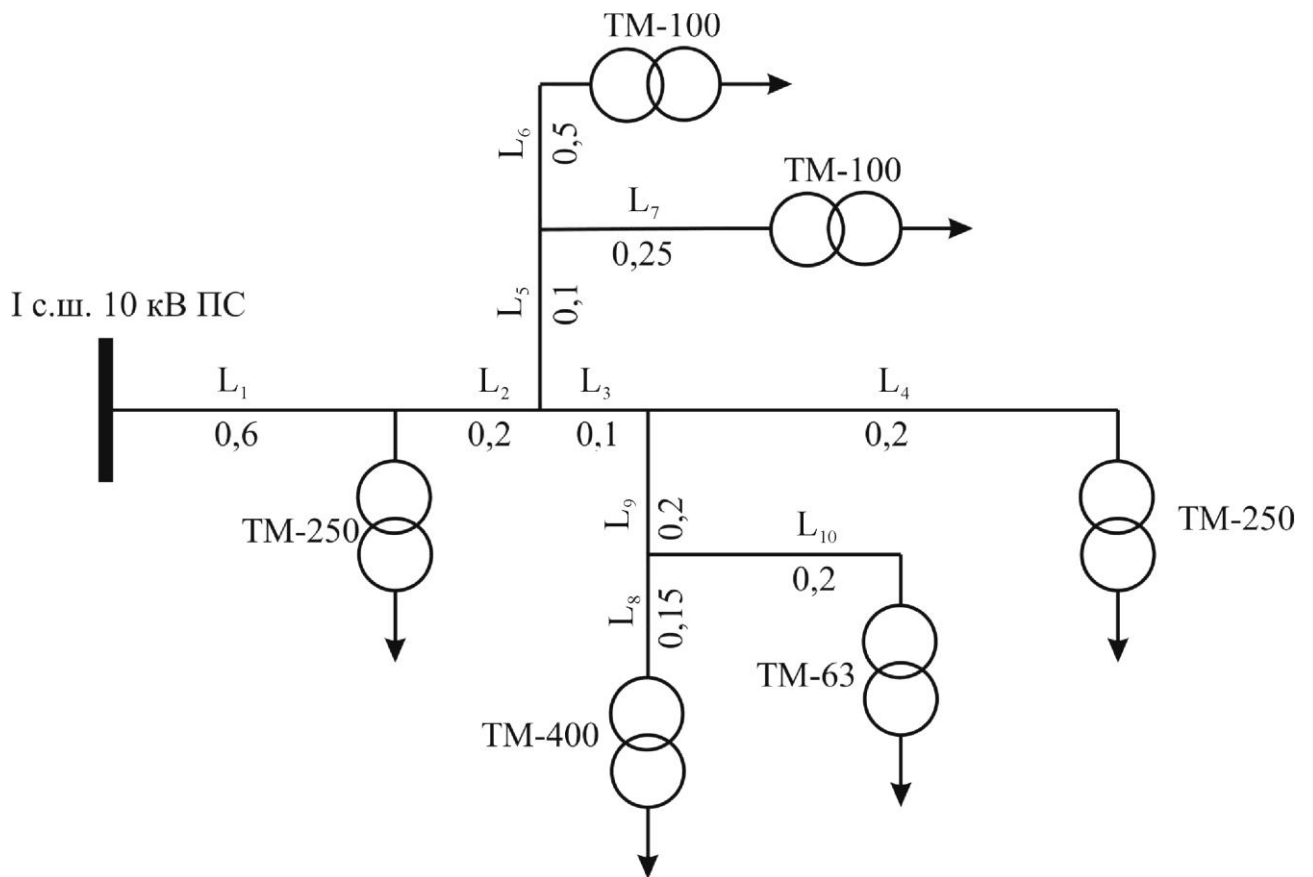


Рисунок 5.7 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

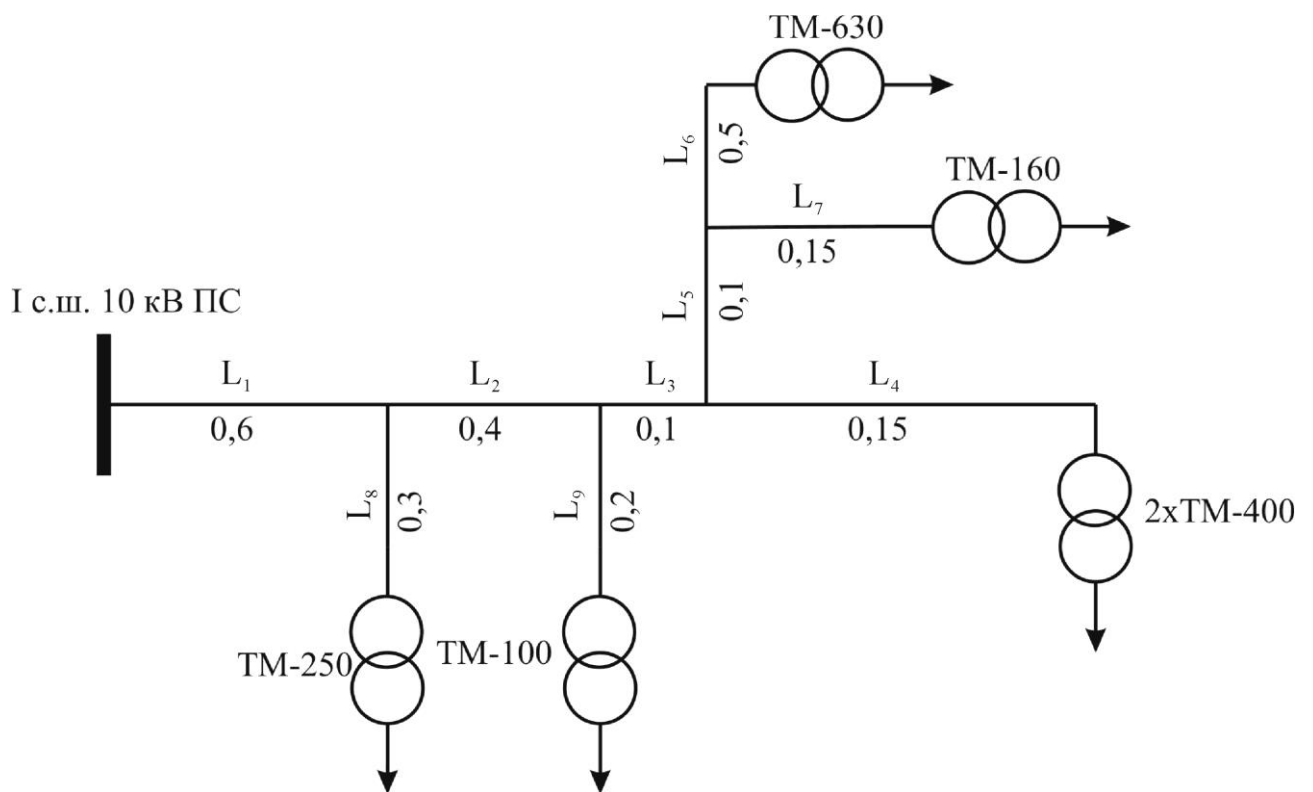


Рисунок 5.8 – Фрагмент електричної мережі напругою 10(6) кВ

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ІЕС 60909-0:2007 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислення сили струму Введ. 2009-01-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 48 с.
2. 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.
3. Бодунов В.М., Гай О.В. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах: Навч. посібник/ К. : ЦП "Компринт", 2020. - 399 с.
4. Arrilaga J. Power systems electromagnetic transients simulation / Arrilaga J. – IET, London, 2007. – 449 p.
5. Saccomanno F. Electric power systems. Analysis and control / Saccomanno F. – IEEE Press, 2003. – 730 p.